

Карельский научный центр
Российской академии наук

ТРУДЫ

КАРЕЛЬСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

№ 9, 2016

Серия ЛИМНОЛОГИЯ

Петрозаводск
2016

Главный редактор

А. Ф. ТИТОВ, член-корр. РАН, д. б. н., проф.

Редакционный совет

А. М. АСХАБОВ, академик РАН, д. г.-м. н., проф.; Т. ВИХАВАЙНЕН, доктор истории, проф.; А. В. ВОРОНИН, д. т. н., проф.; С. П. ГРИППА, к. г. н., доцент; Э. В. ИВАНТЕР, член-корр. РАН, д. б. н., проф.; А. С. ИСАЕВ, академик РАН, д. б. н., проф.; А. М. КРЫШЕНЬ (зам. главного редактора), д. б. н.; Е. В. КУДРЯШОВА, д. флс. н., проф.; В. В. МАЗАЛОВ, д. ф.-м. н., проф.; И. И. МУЛЛОНЕН, д. фил. н., проф.; Н. Н. НЕМОВА, член-корр. РАН, д. б. н., проф.; В. В. ОКРЕПИЛОВ, академик РАН, д. э. н.; О. Н. ПУГАЧЕВ, член-корр. РАН, д. б. н.; Ю. В. САВЕЛЬЕВ, д. э. н.; Д. А. СУБЕТТО, д. г. н.; Н. Н. ФИЛАТОВ, член-корр. РАН, д. г. н., проф.; В. В. ЩИПЦОВ, д. г.-м. н., проф.

Editor-in-Chief

A. F. TITOV, RAS Corr. Fellow, DSc (Biol.), Prof.

Editorial Council

A. M. ASKHABOV, RAS Academician, DSc (Geol.-Miner.), Prof.; N. N. FILATOV, RAS Corr. Fellow, DSc (Geog.), Prof.; S. P. GRIPPA, PhD (Geog.), Assistant Prof.; A. S. ISAEV, RAS Academician, DSc (Biol.), Prof.; E. V. IVANTER, RAS Corr. Fellow, DSc (Biol.), Prof.; A. M. KRYSHEN' (Deputy Editor-in-Chief), DSc (Biol.); E. V. KUDRYASHOVA, DSc (Phil.), Prof.; V. V. MAZALOV, DSc (Phys.-Math.), Prof.; I. I. MULLONEN, DSc (Philol.), Prof.; N. N. NEMOVA, RAS Corr. Fellow, DSc (Biol.), Prof.; V. V. OKREPILOV, RAS Academician, DSc (Econ.); O. N. PUGACHYOV, RAS Corr. Fellow, DSc (Biol.); Yu. V. SAVELIEV, DSc (Econ.); V. V. SHCHIPTSOV, DSc (Geol.-Miner.), Prof.; D. A. SUBETTO, DSc (Geog.); T. VIHAVAINEN, PhD (Hist.), Prof.; A. V. VORONIN, DSc (Tech.), Prof.

Редакционная коллегия серии «Лимнология»

Н. В. ИЛЬМАСТ, д. б. н.; С. Д. ГОЛОСОВ, к. ф.-м. н.; С. Ф. КОМУЛАЙНЕН, д. б. н.; Е. А. КУРАШОВ, д. б. н.; М. ЛЕППЯРАНТА, доктор; П. А. ЛОЗОВИК, д. х. н.; Ю. Н. ЛУКИНА, д. б. н.; Л. Е. НАЗАРОВА (зам. ответственного редактора), к. г. н.; Л. А. ПЕСТРЯКОВА, д. г. н.; Т. И. РЕГЕРАНД (ответственный секретарь), к. б. н.; А. РОЗЕНТАУ, доктор; Д. А. СУБЕТТО (зам. ответственного редактора), д. г. н.; А. А. ТЕРЖЕВИК, к. т. н.; Н. Н. ФИЛАТОВ (ответственный редактор), чл.-корр. РАН, д. г. н., проф.; Г. Т. ФРУМИН, д. х. н.

Editorial Board of the Limnology Series

N. V. IL'MAST, DSc (Biol.); S. D. GOLOSOV, PhD (Phys.-Math.); S. F. KOMULAINEN, DSc (Biol.); E. A. KURASHOV, DSc (Biol.); M. LEPPYARANTA, PhD; P. A. LOZOVIK, DSc (Chem.); Yu. N. LUKINA, DSc (Biol.); L. E. NAZAROVA (Deputy Editor-in-Charge), PhD (Geog.); L. A. PESTRYAKOVA, DSc (Geog.); T. I. REGERAND (Executive Secretary), PhD (Biol.); A. ROZENTAU, PhD; D. A. SUBETTO (Deputy Editor-in-Charge), DSc (Geog.); A. A. TERZHEVIK, PhD (Tech.); N. N. FILATOV (Editor-in-Charge), RAS Corr. Fellow, DSc (Geog.), Prof.; G. T. FRUMIN, DSc (Chem.).

ISSN 1997-3217 (печатная версия)
ISSN 2312-4504 (онлайн-версия)

Адрес редакции: 185910 Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11

тел. (8142)762018; факс (8142)769600

E-mail: trudy@krc.karelia.ru

Электронная полнотекстовая версия: <http://transactions.krc.karelia.ru>

© Карельский научный центр РАН, 2016

© Институт водных проблем Севера

Карельского научного центра РАН, 2016

ГИДРОФИЗИКА. ГИДРОЛОГИЯ

УДК 556.06:556.55: 556.5.06

О ПРОГНОЗЕ МНОГОЛЕТНИХ ИЗМЕНЕНИЙ УРОВНЯ ВОДЫ КРУПНЫХ ОЗЕР

Т. Ю. Выручалкина^{1,2}, Н. Н. Филатов², Н. А. Дианский^{2,3}, А. В. Гусев^{2,3}

¹ Институт водных проблем РАН

² Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН

³ Институт вычислительной математики РАН

Работа посвящена оценке современного состояния и долгосрочному прогнозу внутривековых колебаний уровня воды крупных озер Евразии. На основе данных реанализа и результатов численного моделирования выполнен анализ влияния климатических изменений в Северной Атлантике на гидрологический режим водосборов Каспийского моря, Ладожского и Онежского озер. Выполнены оценки связи ряда индексов атмосферной и океанской циркуляции, описывающих климатическую изменчивость Северной Атлантики и Европы, с водным режимом бассейнов Волги и Невы. Исследованы причинно-следственные связи между климатическими характеристиками и гидрологическим режимом водосборов и уровнем озер. Показано запаздывание на несколько лет реакции гидрологического режима (стока рек, уровня Каспия) при изменениях атмосферной циркуляции. Динамика осадков на водосборе Каспия согласуется с изменениями циркуляционных индексов. Выполнена оценка транспорта влаги из Атлантики в европейскую часть России в XXI веке с использованием комбинированного сценария климатических изменений, основанного на композиции «парникового» и «циклического» эффектов. Результаты расчетов показывают возможное сокращение транспорта влаги и уменьшение атмосферных осадков на европейской части России в ближайшие 15–20 лет, в результате которого с задержкой в несколько лет будет продолжаться падение уровня воды Каспия и Ладожского озера. Приблизительно с 2035 до 2070 г. ожидается увеличение транспорта влаги, что должно привести к росту осадков и повышению уровня этих водоемов.

К л ю ч е в ы е с л о в а: прогноз; уровень воды; озера; климат; изменчивость.

**T. Yu. Vyurchalkina, N. N. Filatov, N. A. Diansky, A. V. Gusev. ON
FORECASTING LONG-TERM VARIATIONS OF WATER LEVEL IN LARGE
LAKES**

The paper assesses the present-day state and long-term forecast of intrasecular oscillations of water level in large Eurasian lakes. The analysis of the North Atlantic climate

change influence on the catchments hydrological regime of the Caspian Sea and Ladoga and Onega lakes was made on the basis of the reanalysis data and numerical simulation results. The connection between some indexes of atmospheric and oceanic circulation describing climatic variability of the North Atlantic and Europe and hydrological regime of Volga and Neva rivers basins was estimated. The paper investigates the causal effects between climatic characteristics and catchments hydrological regime and the lakes water level. Several years' time lag of hydrological regime (rivers runoff, the Caspian Sea level) response to changes in atmospheric circulation was shown. The dynamics of precipitation in the Caspian catchment correspond to changes in circulation indexes. Moisture transport from the Atlantic to the European part of Russia in the 21st century was estimated using the combined scenario of climate changes based on the hybrid of greenhouse and cyclic effects. The simulation results reveal possible decrease of moisture transport and atmospheric precipitation over the European part of Russia for the next 15–20 years resulting (with several years' time lag) in the ongoing water level decrease in the Caspian Sea and Lake Ladoga. Moisture transport increase is expected from around 2035 to 2070, which will presumably lead to precipitation increase and water level rise in these water bodies.

Key words: forecast; water level; lakes; climate; variability.

Введение

Долгосрочный прогноз уровня воды крупных озер мира остается важной, но до сих пор не решенной фундаментальной и практической проблемой. Знание закономерностей внутри-вековой изменчивости уровня воды крупнейших (великих) озер Евразии и Северной Америки важно для обеспечения экономической деятельности на водосборе озер: безопасной работы водного транспорта, проведения берегозащитных работ, разработки мероприятий по адаптации экономики региона к дальнейшим изменениям уровня, которые прогнозируются до конца XXI века.

Выбор схемы и метода прогноза связан с поставленной задачей и зависит от необходимой заблаговременности, а также от внутренней структуры процесса изменчивости уровня воды в озерах. В практике гидрометеорологических прогнозов для великих озер Европы – Ладожского и Онежского – использовались методы межгруппового учета аргументов [Филатов, Филатова, 1990], авторегрессионные модели и другие подходы [Румянцев, Трапезников, 2008]. При расчетах, связанных с резкими антропогенными изменениями элементов водного баланса (ЭВБ) и нестационарностью изменений уровня как по математическому ожиданию, так и по дисперсии, например, для Каспия, вышеуказанные модели непригодны. Прогнозы (точнее, сценарии возможных изменений) многолетних изменений гидрологического режима Ладожского и Онежского озер были выполнены с использованием гидрологических моделей и моделей общей циркуляции атмосферы и океана [Климат..., 2004;

Rukhovets, Filatov, 2010]. По данным длительных измерений температуры приземного слоя атмосферы (ТПА) и атмосферных осадков, а также по результатам моделирования на модели ECHAM4/OPYC3 с учетом сценариев IPCC были построены карты-схемы распределения климатических характеристик и изменений ЭВБ для водосборов Ладожского и Онежского озер [Rukhovets, Filatov, 2010]. В этой работе было показано, что в новых климатических условиях для водосбора этих озер по двум сценариям [IPCC..., 2013] климатическая норма годовой ТПА может увеличиться к 2050 г. до 2–3 °С; годовые суммы осадков в средних многолетних значениях изменятся незначительно, речной сток уменьшится на 3–8 %, и при увеличении испарения на водосборе уровень воды в Ладожском и Онежском озерах до 2050 г. должен постепенно снижаться.

Полезным может быть опыт диагноза и прогноза изменений уровня Великих американских озер (ВАО), для которых были даны прогнозы многолетних изменений уровня воды вплоть до конца XXI века с использованием моделей глобального и регионального климата. Разработаны т. н. модели оффлайн и онлайн [Angel, Kunkel, 2009]. Создана система прогнозирования сезонных колебаний уровня воды, течений, температуры, льда, донных отложений «Great Lakes Coastal Forecasting System – GLCFS» для обеспечения водного транспорта, энергетики и других целей [Gronewold et al., 2013; MacKay, Seglenieks, 2013]. Имеется также развитая гидрологическая прогностическая система для ВАО (Great Lakes Advanced Hydrologic Prediction System – AHPS), которая представляет собой полуавтоматическую систему, комбинирующую

данные наблюдений с математическими моделями. С помощью этих моделей прогнозируется уровень воды и другие гидрологические переменные ВАО с заблаговременностью до 9 месяцев. По результатам моделирования с использованием 23 моделей земной системы климата (МЗС) при относительно низких, умеренных и высоких антропогенных воздействиях были выполнены оценки изменений климата в регионе и оценено влияние этих изменений на гидрологический режим водосбора ВАО [Lofgren et al., 2011]. С использованием МГК были выполнены расчеты по более чем 600 сценариям [Angel, Kunkel, 2009; Gronewold et al., 2013]. Оценки показали, что уровень воды ВАО, вероятнее всего, будет уменьшаться к концу XXI в. на 2–3 м, но по некоторым сценариям, может и подняться на величину до 1 м. При всех сценариях отклик уровня воды оз. Верхнего был наименьшим для Великих озер. Для озер Мичиган и Гурон средние изменения в уровнях к 2080–2094 гг. могут составлять от 0,25 до 0,41 м. В работе [Notaro, Bennington, 2015] с применением сочетания региональной и глобальной моделей с разрешением 24 км оценена реакция изменений гидрологического режима озера. С использованием одномерной озерной и гидрологической моделей рассчитывались климатические изменения в сезонном и многолетнем масштабах. Для разных сценариев и моделей были показаны как увеличение уровня воды озер, так и его падение до середины XXI в.

Многолетние изменения уровня Каспийского моря и составляющих его водного баланса исследуются на основе различных подходов. Использовались вероятностные модели, линейные и нелинейные стохастические модели [Раткович, 1993; Голицын и др., 1998]. Но прогнозы уровня моря с использованием этих подходов не оправдались. Данные наблюдений свидетельствуют о том, что в конце XX века отмечался рост уровня моря, а с 1995 г. по настоящее время – снижение, превысившее метр. Попытки прогноза уровня Каспия с учетом прогноза антропогенных изменений климата [Будыко и др., 1988] также нельзя признать успешными. В работе [Фролов, 2003] предлагался способ расчета уровня режима Каспийского моря на долговременную перспективу (порядка 20 лет), с периодической корректировкой прогнозов с учетом фактического положения и тенденции изменения уровня моря, климатических параметров, определяющих формирование водного баланса моря, а также последствий антропогенной деятельности в бассейне водоема. В статье [Arpe, Roeckner,

1999] с использованием моделей общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО) показан возможный подъем уровня Каспия в XXI в. По результатам [Leroy, Arpe, 2007] и [Мелешко, 2008] с использованием трех и семи МОЦАО соответственно показано, что уровень моря в XXI веке не будет существенно изменяться. В работе [Elguindi, Giorgi, 2006] для разных сценариев (IPCC A2 и A1b) получено, что в течение XXI века по большинству моделей, напротив, ожидается устойчивое снижение уровня Каспийского моря.

Таким образом, представленные результаты демонстрируют как возможное снижение уровня озер, так и его повышение или стабилизацию в XXI веке. По разным расчетам уровня воды Великих американских озер и озер Евразии отмечается большая неопределенность в прогнозе внутривековых изменений уровня воды озер, что затрудняет планирование экономической деятельности и принятие мер по адаптации к возможным изменениям климата.

Оценка влияния климатической изменчивости Северной Атлантики на климат и гидрологический режим водосборов и уровень воды крупных озер

Анализ изменения климата и оценка влияния Северной Атлантики на гидрологический режим и уровень крупных озер европейской части России (ЕЧР) осуществлялись как непосредственно по данным длительных измерений (приземная температура воздуха, атмосферные осадки и атмосферное давление) на станциях Росгидромета (с середины XIX века до 2014 г.), так и по расчетным на их основе с шагом 0,5° по широте и долготе сеточным данным [Панин и др., 2015]. Такая дискретность является вполне приемлемой для исследования региональных изменений климата в бассейнах крупных водных объектов. Сеточные поля данных использовались как для получения осредненных характеристик по площади водосборов, административных образований и физико-географических зон, так и для построения карт месячных, сезонных и годовых характеристик температурно-влажностного режима ЕЧР.

Полученные результаты позволяют констатировать, что в целом за период 1946–2014 гг. на ЕЧР среднегодовая температура воздуха выросла на 1,7 °С, а сумма годовых осадков с 1960 г. – на 70 мм. Климатические изменения на ЕЧР происходили неоднородно, что ранее также отмечалось [Анисимов и др., 2003], и в их динамике отчетливо выделяется три периода. В 1946–1965 гг. – снижение среднегодовых

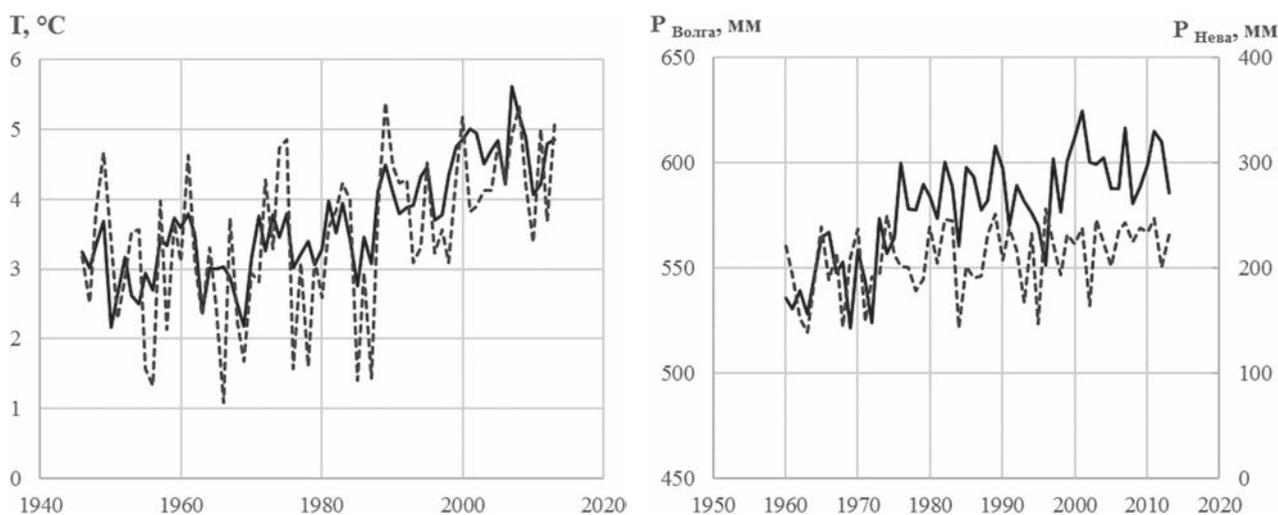


Рис. 1. Среднегодовые значения температуры воздуха (слева) и суммарные годовые осадки (справа) в бассейнах р. Волги (сплошная линия) и р. Невы (пунктирная линия) по данным 1946–2014 гг.

температур с ослаблением этой тенденции с севера на юг, причем основной вклад в похолодание приходился на холодный период года (ноябрь–март). В 1966–1995 гг. – повышение температур с ростом сумм годовых осадков, при этом температуры за ноябрь–март растут в среднем в 2 раза быстрее, чем за теплый период (апрель–октябрь). 1996–2014 годы отмечены наибольшим ростом среднегодовых температур ($0,84\text{ }^{\circ}\text{C} / 10\text{ лет}$) и уменьшением атмосферных осадков для регионов южнее 60° с. ш. , с ростом температур теплого периода в ~ 2 раза быстрее, чем холодного. Однако в последние годы наметилась тенденция на замедление процесса потепления, а в зимние месяцы отмечается похолодание с усилением его с юга на север, что также было показано [Груза и др., 2008]. Вышесказанное иллюстрирует рисунок 1, где представлены графики колебания среднегодовой температуры и сумм годовых осадков, осредненных по площади бассейнов рек Волги и Невы. Анализ аномалий осадков, выполненный ранее [Панин и др., 2014], показал, что для бассейна р. Волги характерен их дефицит в летние и осенние месяцы в последние 10–15 лет.

В целом можно сделать вывод о том, что с удалением от полюсов амплитуда квазипериодических колебаний температур воздуха уменьшается. Проявление квазициклических эффектов более заметно в приполярных, чем в южных широтах ЕЧР из-за более сильного контраста в значениях альбедо для облаков и снежной поверхности [Панин и др., 2014]. Таким образом, можно сделать вывод, что отклонение температуры воздуха и атмосферных осадков в Северном полушарии от нормы

имеет широтную зависимость, что совпадает с выводами из 4-го и 5-го отчетов МГЭИК [IPCC..., 2007, 2013].

Хорошо известно (см., например, [Панин и др., 2015]), что колебания уровня Каспия тесно коррелируют с изменениями стока р. Волги. Анализ временной изменчивости осадков для водосбора Волги (рис. 1) за период с 1960 по 2013 г. также выявил наличие периодов их роста и спада, что неизбежно должно привести к изменению стока Волги. Между стоком Волги и суммарными годовыми осадками на ее водосборе взаимная корреляция составляет по абсолютной величине $r = 0,4$, а максимальное значение характерно для стока текущего года и осадков предшествующего $\sim 0,65$ [Панин и др., 2015]. Период роста объемов стока Волги и осадков до 1990 г. хорошо согласуется. Однако с начала 1990-х годов на водосборе Волги отмечается сокращение осадков за апрель–октябрь. В последние 10–15 лет уменьшаются и осадки за ноябрь–март, что способствует еще большему снижению стока Волги за последние годы. Отметим, что график колебания уровня Каспия за последние 25–35 лет имел бы вид более близкий к колебаниям стока Волги, если бы не производилось сначала регулирование оттока через залив Кара-Богаз-Гол посредством строительства дамбы [Фролов, 2003], а затем ее вскрытие в 1992 г. В целом смена тенденций колебания уровня Каспийского моря, изменение стока Волги и осадков на ее водосборе согласуются между собой. Принимая во внимание, что характер динамики стока р. Волги является определяющим в уровненом режиме Каспийского моря, можно констатировать, что колебания уровня моря

существенным образом зависят от режима атмосферных осадков в бассейне реки. Таким образом, качественный прогноз уровня режима Каспия может зависеть от точности прогнозирования гидрометеорологического режима, в особенности режима осадков в бассейне Волги.

Для надежного прогноза многолетних изменений гидрологического режима и водных экосистем требуется совершенствование знаний о закономерностях глобальных изменений климата и их связи с региональными изменениями. Влияние Атлантики на изменение уровня озер Евразии проявляется в конечном итоге за счет переноса тепла и влаги с акватории Северной Атлантики в регион ЕЧР [Малинин, 1994; Тужилкин и др., 2011]. Это влияние проявляется в изменчивости Атлантической термохалинной циркуляции (АТХЦ), которая представляет собой крупномасштабный меридиональный круговорот воды в Северной Атлантике и в целом формирует меридиональный перенос тепла (МПТ) в высокие широты Северного полушария. Обнаруженный в работе [Голицын и др., 1990] тренд модуля скорости ветра дает основание предполагать возможность существования различий в многолетних тенденциях скорости ветра в зависимости от его направления на ЕЧР.

Изменчивость результирующего потока тепла между Северной Атлантикой и атмосферой, так же как и АТХЦ, характеризуется значительными долгопериодными (несколько десятков лет) колебаниями [Панин и др., 2014]. Интенсивность климатического воздействия Атлантического океана на вариации климата ЕЧР напрямую должна быть связана с величиной результирующего потока тепла между океаном и атмосферой. По результатам модельных расчетов на МОЦАО, разработанной в ИВМ РАН [Володин и др., 2013], эта величина колеблется от 14 до 21 Вт/м², достигая максимума в начале 1990-х. Интенсификация результирующего потока тепла между Атлантикой и атмосферой в последние десятилетия XX века могла способствовать более мощному воздействию Атлантики на ЕЧР в этот период.

Атлантическая мультидекадная осцилляция (АМО) – процесс, который является следствием не только атмосферного воздействия, но и собственных долгопериодных колебаний океана, обусловленных изменчивостью термохалинной циркуляции в Северной Атлантике. Влияние АМО на формирование климатической изменчивости Европы должно осуществляться через динамику АТХЦ. Интенсивность АТХЦ характеризуется значительными долгопериодными

колебаниями, сопровождаемыми аномалиями температуры поверхности океана (ТПО) в Северной Атлантике [Latif et al., 2004]. По данным [Панин, Дианский, 2014], в 1960–1990 гг. происходило увеличение интенсивности АТХЦ, а с 1990-х гг. заметно падение ее интенсивности, которое проявляется также и для эволюции МПТ. Падение этих величин согласуется с ростом ТПО в указанные годы, проявляющимся в росте индекса АМО. Такой ход индексов АТХЦ и АМО объясняется тем, что при росте приповерхностной температуры и осадков в субарктических широтах следует ожидать уменьшения солёности и плотности приповерхностного слоя Северного Ледовитого океана и арктических морей. Этому же способствуют таяние морских льдов и увеличение речного стока в арктический бассейн [Володин и др., 2013]. В результате должна увеличиться устойчивость верхнего слоя океана, приводящая к ослаблению высокоширотных конвективных процессов и интенсивности меридионального круговорота в Атлантике с соответствующим изменением положения и ослаблением Гольфстрима как одной из составляющих АТХЦ. Это в свою очередь может существенно сказаться на региональных особенностях климата высоких и средних широт Северного полушария, в частности европейского климата. Этот процесс может определять связь между долгопериодной изменчивостью АТХЦ и климатическими режимами в Евразии и Арктике [Martin, Ruprecht, 2007; Семенов и др., 2014].

Для оценки влияния климата Северной Атлантики на изменение климата ЕЧР и гидрологического режима водоемов в настоящей работе использовались индексы Североатлантического колебания (или North Atlantic oscillation – NAO), АМО, Скандинавской циркуляции (или Scandinavian pattern – SCA), Восточноатлантической циркуляции (или East Atlantic – EA), АТХЦ и др.

Согласованность в тенденциях хода уровня Каспийского моря с индексами NAO, EA, SCA, АМО, АТХЦ и МПТ свидетельствует о влиянии последних на динамику уровня моря (рис. 2). На рисунке представлены среднегодовые значения NAO и АТХЦ и средние значения АМО за март–май. Следует заметить, что изменение тенденций циркуляционных индексов происходит с опережением основных тенденций в уровне Каспия приблизительно на пять лет. Между колебаниями уровня Ладожского озера и циркуляционными индексами нет столь явной согласованности, но в то же время наблюдаются периоды синхронных тенденций (рис. 2). Все эти факты представляются важными, так как

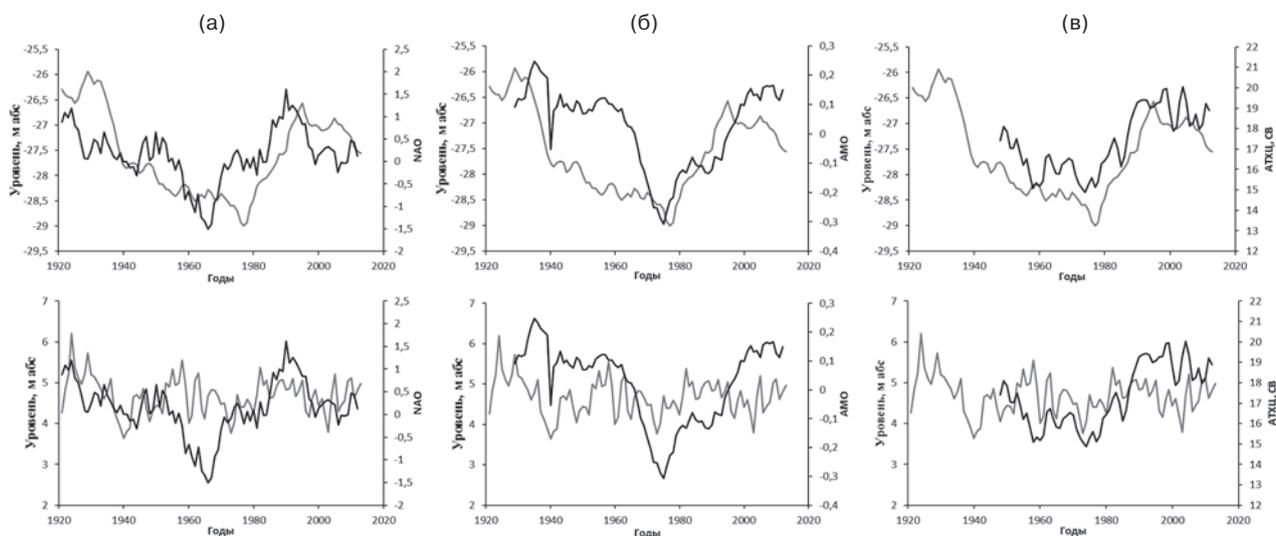


Рис. 2. Уровень Каспийского моря (сверху) и Ладожского озера (снизу) и индексы NAO (а), АМО (б) и АТХЦ (в). Уровень воды (серая кривая), циркуляционные индексы (черная кривая)

позволяют рассматривать используемые здесь индексы атмосферной и океанской циркуляций в качестве предикторов для долгосрочного прогнозирования уровня режима озер.

Корреляционный анализ показал, что между среднегодовым уровнем Каспийского моря и индексами EA, AMO, NAO, SCA корреляция составляет $\sim 0,5$ и выше. А корреляция между циркуляционными индексами, с одной стороны, и температурой и осадками, с другой, также достигает значений $0,4-0,5$ как по годовым, так и по сезонным параметрам. Наибольшие величины корреляции характерны для EA с приповерхностной температурой атмосферы (ПТА) $\sim 0,7$ и EA с атмосферными осадками $\sim 0,6$. Данные предварительно были сглажены скользящим средним по 9-летнему циклу с целью исключить при анализе процессов климатического масштаба высокочастотные колебания. По данным за 1946–1998 гг. наблюдается хорошая согласованность между среднегодовыми температурами на ЕЧР и всеми принятыми для расчетов индексами. В период 1960–2014 гг. влияние климатической изменчивости Северной Атлантики на температуру воздуха ЕЧР более заметно, с максимальными величинами в бассейне р. Волги. Схожая картина наблюдается в зависимости годовых осадков от климата Атлантики. На рисунке 3 представлены карты-поля корреляций между осадками и индексами NAO, EA и SCA. Наибольшие величины корреляции отмечаются на территории водосбора Волги.

Согласованность в тенденциях гидрометеорологических характеристик для ЕЧР с индексами атмосферной и океанической циркуляции позволяет сделать вывод, что колебания

уровня Каспийского моря и озер ЕЧР, очевидно, зависят от изменчивости климата Северной Атлантики. Так, уменьшение годовых сумм осадков на ЕЧР связано с ослаблением NAO, AMO и увеличением интенсивности SCA в последние 20 лет и сокращением выноса влаги в этот регион.

О прогностических сценариях изменений климата и влияния этих изменений на гидрологический режим водосборов Ладожского, Онежского озер и Каспийского моря

Ранее в работах [Панин, Дианский, 2014; Панин и др., 2015] были предприняты первые попытки по расчету транспорта влаги с Атлантики и его влияния на формирование климатической изменчивости озер ЕЧР. В настоящее время работа по уточнению потоков тепла и влаги на ЕЧР продолжена. Выполнены расчеты в рамках совместного анализа уравнения водного баланса моря и уравнения баланса влаги региона, включающего водоем и его бассейн, а также проведены эксперименты по воспроизведению циркуляции Мирового океана и ее климатической изменчивости с помощью МОЦАО, разработанной в ИВМ РАН [Гусев, Дианский, 2014] и получившей в международной практике название INMOM (Institute of Numerical Mathematics Ocean Model). Такой подход позволяет дать физическое объяснение изменений уровня крупных озер, включая Каспийское море, Ладожское, Онежское и Байкал, и, следовательно, сформировать их прогноз [Панин и др., 2015; Филатов и др., 2016].

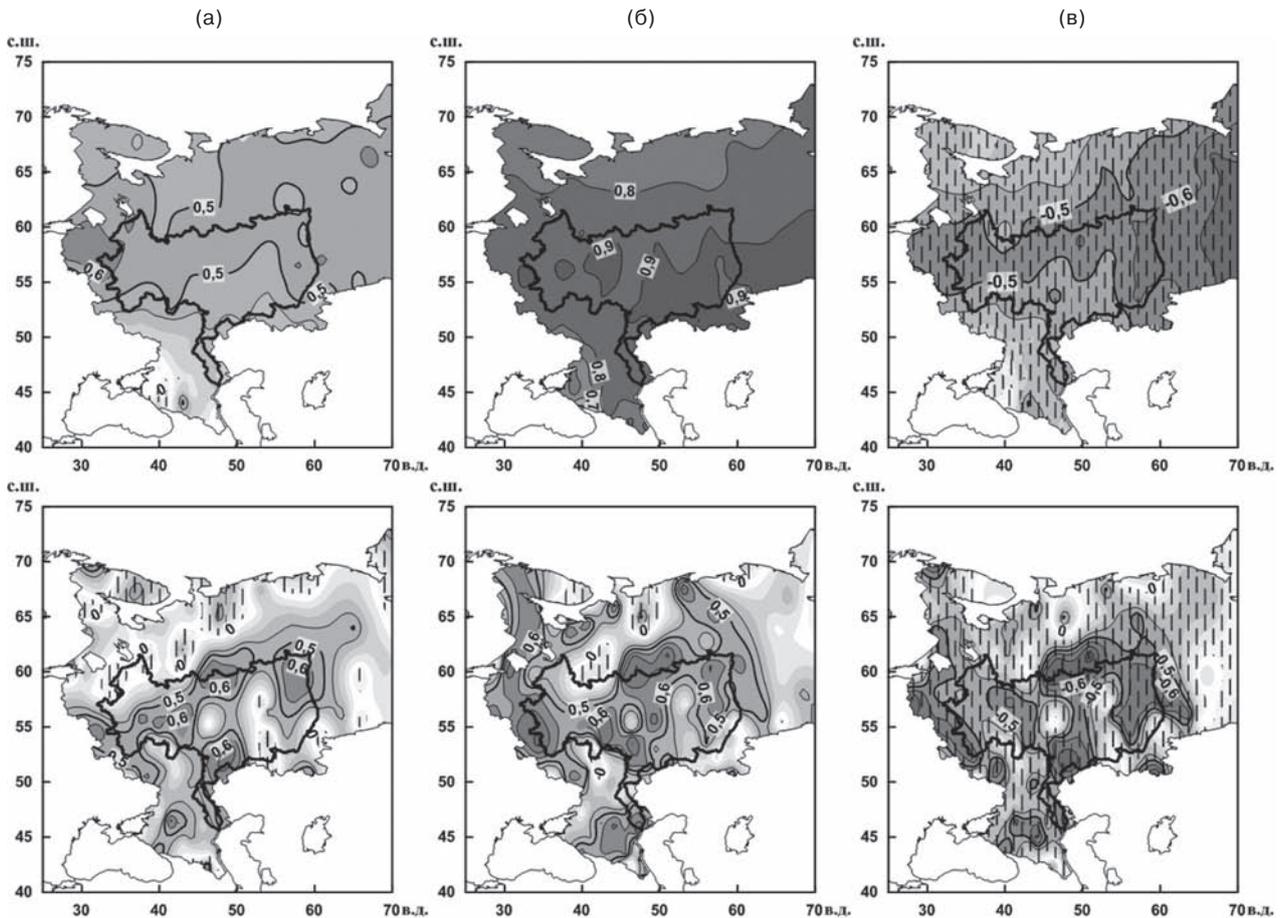


Рис. 3. Корреляция между среднегодовыми значениями температуры (сверху), годовыми осадками (снизу) и индексами NAO (а), EA (б) и SCA (в) за 1960–2014 гг. Жирная черная кривая – граница бассейна р. Волги

Покажем, как изменчивость гидрологического режима озер может быть описана с привлечением уравнений водного баланса озера и баланса влаги его бассейна. Выпишем уравнение водного баланса замкнутого водоема применительно к Каспийскому морю:

$$dh/dt = Q(t)/F(h) + P_L - E_L + U/F(h), \quad (1)$$

где $Q(t)$ – речной сток; U – подземный сток; $F(h)$ – площадь зеркала моря при уровне моря h ; P_L и E_L – атмосферные осадки и испарение над зеркалом моря.

Далее запишем уравнение баланса влаги над регионом, включающим водоем и его бассейн, в следующем виде:

$$dW/dt + W_r = E - P, \quad (2)$$

где W – интегральное влагосодержание атмосферы над регионом; W_r – суммарный поток влаги через боковую границу Γ рассматриваемого региона; P и E – соответственно атмосферные осадки и испарение, проинтегрированные по площади региона. Уравнение (2) получают путем интегрирования уравнения для влажности

атмосферы [Малинин, 1994] по площади рассматриваемого региона и от поверхности земли до некоторой большой высоты, на которой содержание влаги пренебрежимо мало по сравнению с нижележащими слоями. В уравнениях (1) и (2) будем полагать, что все переменные являются среднегодовыми величинами и производные по времени характеризуют межгодовую изменчивость.

В случае Каспийского моря слагаемым $U/F(h)$ можно пренебречь, поскольку $U/F(h) \approx (0.01 \dots 0.02)E_L$ [Панин, Дианский, 2014].

Учитывая также, что среднегодовой речной сток определяется в основном разностью осадков и испарения на водосборе, положим $Q(t)/F(h) = (P/F(h) - P_L) - (E/F(h) - E_L)$. Тогда из уравнения (1) получим соотношение:

$$dh/dt = (P/F(h) - P_L) - (E/F(h) - E_L) + P_L - E_L \equiv (P - E)/F(h), \quad (3)$$

показывающее, что изменения уровня Каспийского моря определяются балансом осадков и испарения во всем регионе.

Сравнивая уравнения (2) и (3), получаем, что изменение уровня Каспийского моря может быть определено в виде:

$$\frac{dh}{dt} = \left(\frac{dW}{dt} + W_r \right) \left(-\frac{1}{F(h)} \right) \approx -W_r / F(h). \quad (4)$$

Из (1)–(4) следует, что изменение атмосферных осадков, испарения и уровня моря существенным образом зависит от интенсивности горизонтального переноса воздушных масс.

Количество переносимой влаги зависит от содержания влаги в самой атмосфере над Северной Атлантикой. И рассчитывается по формуле:

$$F = \frac{1}{g} \int_{P_n}^{P_0} qu \, dP,$$

где q – массовая доля влаги (удельная влажность); u – горизонтальный вектор ветра; g – ускорение свободного падения; P_0 и P_n – давление у поверхности моря и на верхней границе выбранного слоя атмосферы. В работе [Панин и др., 2015] было показано, что транспорт влаги (ТВ), выносимой с Северной Атлантики на территорию Европы, хорошо согласуется с изменениями термохалинной циркуляции океана и индексами атмосферной циркуляции.

По данным длительных измерений были отмечены определенные долгопериодные компоненты в изменениях климата с временными масштабами 30–60 лет, имеется также квазидвухлетняя цикличность и флуктуации с временными масштабами в несколько лет [Монин, Сонечкин, 2005; Володин, 2016]. Природа этих колебаний климата изучена недостаточно хорошо, проявляются они асинхронно в разных регионах. Это непериодические колебания, хотя ряд авторов пытаются выявить такие периодические компоненты для гидрологического режима водоемов и водосборов. Но эти изменения, как отмечается в [Мохов и др., 2013], представляют собой некий осциллятор, при котором система совершает колебания, показатели которых циклически повторяются во времени с изменением амплитуды, временного масштаба и взаимодействий. Эти климатические осцилляторы порождают сложную изменчивость климата на фоне тренда, вызванного антропогенными причинами изменений климата. В частности, с мультидекадной осцилляцией связано замедление потепления, которое проявляется в последние два десятилетия. Важно также отметить, что оценки будущего климата с использованием МОЦАО дают возможность получить не точные прогнозы, а сценарии будущих изменений климата и их влияния на гидрологический режим водоемов.

В работе [Панин и др., 2009] предложена идея, позволяющая дать объяснение не только роста температуры, вызванного эмиссией парниковых газов, но и изменчивости климата с временными масштабами порядка нескольких десятилетий (50–60 лет). Этот подход базируется на композиции «парникового» и «циклического» эффектов:

$$\Delta T \approx \Delta T_{IPCC} + k \sin \omega t,$$

где ΔT – прогнозируемая температура приземного воздуха; ΔT_{IPCC} – температура, прогнозируемая МГЭИК; ω – циклическая частота колебаний климата; k – эмпирический коэффициент, зависящий от местоположения. Данная идея применима и к прогнозу ТВ.

Для уточнения прогнозных оценок изменений климата на территории ЕЧР была использована база данных реанализа NCEP/NCAR. Атмосферные характеристики NCEP/NCAR включают в себя глобальные поля данных, из которых в расчете ТВ используются удельная влажность и скорость ветра на восьми уровнях (1000, 925, 850, 700, 600, 500, 400 и 300 гПа). Далее будут представлены некоторые результаты, полученные в рамках использования комбинированного сценария климатических изменений (комбинация трендовой и циклической составляющей изменений).

Физико-статистический прогноз климатических изменений характеристик циркуляции атмосферы на период 2010–2071 гг. на основе данных 1948–2009 гг.

В качестве исходных данных рассматриваются атмосферные характеристики из базы NCEP за 1948–2009 гг. Для удобства исключаем из них внутригодовую изменчивость, получая набор среднегодовых двумерных глобальных полей $F_T = F_T(\lambda, \varphi, t)$, где T – физический параметр, для которого строится приближение (в данном случае ТВ); $t \in [0, N]$ – время в годах, $N = 62$ – количество лет длины рядов за 1948–2009 гг.; λ – долгота; φ – широта.

Выделим из исходных данных две основные составляющие:

1. Линейный тренд $F_T^{lin} = A \cdot t + B$;
2. 60-летние колебания $F_T^{cos} = C \cdot \cos(\omega \cdot (t - t_0)) + D$,

где $\omega = \frac{2\pi}{T}$ – циклическая частота колебаний в рад/с; $T = 60$ лет – принятая оценка периода циклических климатических колебаний согласно [Панин и др., 2009]; $t_0 = 43$ – момент времени, соответствующий 2000 году, когда наблюдался максимум 60-летнего колебания.

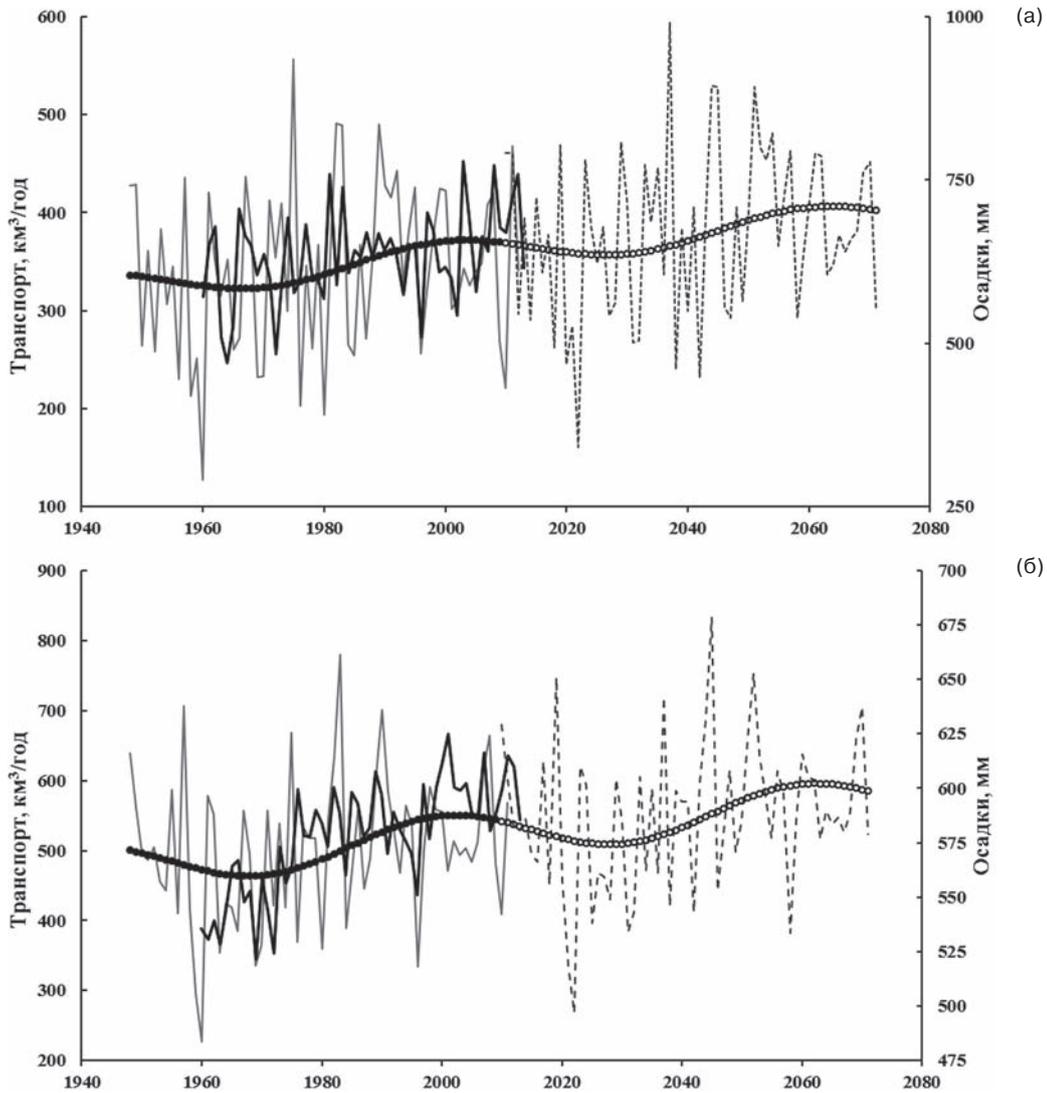


Рис. 4. Комбинированный сценарий изменения горизонтального транспорта влаги ($\text{км}^3/\text{год}$) в XX столетии и прогноз его тенденций в XXI столетии:
 а – поступление в бассейн р. Невы ($26,5^\circ$ в. д.), б – поступление в бассейн р. Волги (35° в. д.).
 Значения F_T (черные точки), изменения T_B (серая линия), атмосферные осадки на водосборе рек (жирная черная линия)

Коэффициенты A, B, C, D являются также двумерными полями, характеризующими каждую точку в пространстве по отдельности, которые рассчитываются по методу наименьших квадратов (МНК).

Изменение данных по времени можно представить как сумму линейного тренда и синусоиды $F_T = F_T^{lin} + F_T^{cos}$. При этом оценку этого выражения можно провести двумя способами. В первом случае из исходного ряда сначала выделяется линейный тренд, а затем из остатка – синусоида. Во втором – наоборот. Следует отметить, что при получении данных для прогноза требуется информация о межгодовой изменчивости, которая может быть получена вычитанием тенденции из исходных данных.

Результаты комбинированного сценария изменения транспорта влаги в Северном полушарии, в бассейнах Ладожского и Онежского озер и Каспийского моря-озера.

Для оценки тенденции T_B были реализованы оба способа, отличающиеся последовательностью выделения линейного тренда и синусоиды из исходного ряда, в результате чего были рассчитаны тенденции F_T^1 и F_T^2 соответственно. При этом итоговая тенденция рассчитывалась как полусумма этих тенденций: $F_T = \frac{1}{2}F_T^1 + \frac{1}{2}F_T^2$ (далее – комбинированный сценарий). На рисунке 4 представлены результаты комбинированного сценария изменения

ТВ в XX столетии и прогноз его тенденций в XXI столетии, показавший лучший результат, чем каждое из исходных приближений в отдельности. ТВ через границу бассейнов р. Невы (27,5° в. д.) и р. Волги (35° в. д.) был выполнен с временным интервалом 1 год для слоя атмосферы от 1000 до 300 гПа. Для р. Невы расчет проводится в диапазоне от 57,5° до 62,5° с. ш., для р. Волги – 52–60° с. ш. Данные на рисунке получены путем описанного выше метода комбинированного сценария. Для этого на основе данных ТВ, полученных при расчете на основе БД NCEP, были рассчитаны значения F_T (черные точки). Затем на эти данные (долгосрочную изменчивость) были наложены межгодовые аномалии изменения ТВ (серая линия), взятые, за неимением лучшего, из предыдущего 62-летнего периода. На рисунке 4 представлена динамика транспорта влаги на высоте 1,5 км (850 гПа), как горизонта с наибольшим значением транспорта влаги. Оставшимся горизонтам свойственны аналогичные изменения ТВ во времени, но с меньшим абсолютным значением. Как видно из рисунка 4, полученный сценарий воспроизводит особенности динамики климата Северной Атлантики, о которых мы упоминали выше (рис. 2). Сравнение результатов расчета ТВ с данными об атмосферных осадках на водосборах Волги и Невы показывает достаточно хорошую их согласованность в период 1948–2009 гг.

В работе [Панин и др., 2015] было показано, что в целом колебания уровня Каспийского моря обусловлены сменой тенденций в транспорте влаги с Атлантики на его бассейн. Действительно, с 1970-х годов величины транспорта влаги с Атлантики на ЕЧР росли и достигли максимальных значений в 1990-х годах. Этот период роста переноса влаги согласуется как с увеличением стока рек Волги и Невы, так и с повышением уровня Каспийского моря, а также Ладожского и Онежского озер. Но в конце 1990-х тенденция изменилась. В настоящее время продолжается сокращение транспорта влаги из Атлантики на ЕЧР (в частности, в бассейн Волги и Невы). На этом фоне наблюдается уменьшение стока рек и падение уровня озер и Каспийского моря. Из рисунка 4 видно, что по комбинированному сценарию в ближайшие 15–20 лет (примерно до 2035 г.) ожидается тенденция на снижение ТВ на ЕЧР. Следовательно, можно предположить, что в ближайшие несколько лет продолжится падение уровня Каспия и Ладожского и Онежского озер. Далее до 2070 г. ожидается новый период повышенного выноса влаги с Атлантики.

Выводы

Выполнен анализ влияния климатических изменений в Северной Атлантике на гидрологический режим водосборов Каспийского моря-озера, Ладожского и Онежского озер. Даны оценки связи индексов атмосферной и океанской циркуляции (NAO, AMO, EA, SCA и АТХЦ) и причинно-следственные связи между климатическими характеристиками и гидрологическим режимом водосборов и уровнем озер. Показано запаздывание на несколько лет реакции гидрологического режима (стока рек, уровня Каспия) при изменениях атмосферной циркуляции. Динамика осадков на водосборе Каспия согласуется с изменениями циркуляционных индексов. Эти данные представляются важными, так как позволяют рассматривать используемые индексы атмосферной и океанской циркуляции в Северной Атлантике в качестве предикторов для совершенствования прогнозирования уровня режима крупных озер.

Использован предложенный в работе [Панин и др., 2009] т. н. комбинированный сценарий климатических изменений, базирующийся на композиции «парникового» и «циклических» эффектов. Этот подход позволяет описывать не только рост температуры воздуха, вызванный эмиссией парниковых газов, но и известную по данным наблюдений изменчивость климата с временными масштабами в несколько десятков (порядка 60) лет. Результаты расчетов показывают возможное сокращение транспорта влаги и уменьшение атмосферных осадков на ЕЧР в ближайшие 15–20 лет, из-за чего с временным сдвигом в несколько лет будет продолжаться падение уровня воды Каспия, а также Ладожского озера. Режим уровня Онежского озера регулируется работой ГЭС, и здесь не так заметно влияние возможных изменений климата. Примерно с 2035 до 2070 г. транспорт влаги из Атлантики увеличится, что приведет к росту осадков и повышению уровня этих водоемов.

В целом можно отметить, что как для Каспия, Ладожского и Онежского озер, так и для Великих американских озер отмечается большая неопределенность долгосрочного прогноза внутривековых изменений уровня вод [Филатов и др., 2016]. Это существенно затрудняет планирование экономической деятельности, принятие мер по адаптации к возможным региональным изменениям, разработку мер по рациональному использованию и охране ресурсов водоемов. Поэтому важной задачей остается совершенствование системы прогноза внутривековых и сезонных изменений колебаний уровня воды, гидрологического режима

и экосистем великих озер Евразии и Северной Америки.

Работа выполнена в Институте водных проблем Севера КарНЦ РАН при финансовой поддержке РФФ (грант № 14-17-00740).

Литература

Анисимов О. А., Белолуцкая М. А., Лобанов В. А. Современные изменения климата в области высоких широт Северного полушария // Метеорология и гидрология. 2003. № 1. С. 18–29.

Будыко М. И., Ефимова Н. А., Лобанов В. В. Будущий уровень Каспийского моря // Метеорология и гидрология. 1988. № 5. С. 86–94.

Володин Е. М., Дианский Н. А., Гусев А. В. Воспроизведение и прогноз климатических изменений в XIX–XXI веках с помощью модели земной климатической системы ИВМ РАН // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49, № 4. С. 379–400.

Володин Е. М. Представление потоков тепла, влаги и импульса в климатических моделях. Потоки с поверхности // Фунд. и прикл. климатология. 2016. Т. 1. С. 28–42.

Голицын Г. С., Дзюба А. В., Осипов А. Г., Панин Г. Н. Региональные изменения климата и их проявления в современном подъеме уровня Каспийского моря // ДАН СССР. 1990. Т. 313, № 5. С. 1224–1227.

Голицын Г. С., Раткович Д. Я., Фортус М. И., Фролов А. В. О современном подъеме уровня Каспийского моря // Водные ресурсы. 1998. Т. 25, № 2. С. 133–139.

Груза Г. В., Ранькова Э. Я., Рочева Э. В. Изменения климата на территории России: температура воздуха и атмосферные осадки // В кн.: Изменение окружающей среды и климата: природные и связанные с ними техногенные катастрофы. Т. 6: Изменения климата: влияние земных и внеземных факторов / Отв. ред. Г. С. Голицын. М.: ИФА РАН, ИФЗ РАН, 2008. С. 11–23.

Гусев А. В., Дианский Н. А. Воспроизведение циркуляции Мирового океана и ее климатической изменчивости в 1948–2007 гг. с помощью модели INMOM // Изв. РАН. Физ. атм. и океана. 2014. Т. 50, № 1. С. 3–15.

Климат Карелии. Изменчивость и влияние на водные объекты / Отв. ред. Н. Н. Филатов. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2004. 224 с.

Малинин В. Н. Проблема прогноза уровня Каспийского моря. СПб.: РГГМИ, 1994. 160 с.

Мелешко В. П., Катцов В. М., Мирвис В. М. и др. Климат России в XXI веке. Часть 1. Новые свидетельства антропогенного изменения климата и современные возможности его расчета // Метеорология и гидрология. 2008. № 8. С. 5–19.

Монин А. С., Сонечкин Д. М. Колебания климата. М.: Наука, 2005. 192 с.

Мохов И. И., Акперов М. Г., Прокофьева М. А. и др. Блоклинги в Северном полушарии и Евро-Атлантическом регионе: оценки изменений по данным

реанализа и модельным расчетам // Доклады Академии наук. 2013. Т. 449, № 5. С. 582–585.

Панин Г. Н., Дианский Н. А. О связи колебаний уровня Каспийского моря и климата Северной Атлантики // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2014. Т. 50, № 3. С. 304–316.

Панин Г. Н., Соломонова И. В., Выручалкина Т. Ю. Климатические тенденции в средних и высоких широтах Северного полушария // Водные ресурсы. 2009. Т. 36, № 6. С. 743–756.

Панин Г. Н., Соломонова И. В., Выручалкина Т. Ю. Режим составляющих водного баланса Каспийского моря // Водные ресурсы. 2014. Т. 41, № 5. С. 488–495.

Панин Г. Н., Выручалкина Т. Ю., Соломонова И. В. Воздействие Северной Атлантики на гидрологический режим бассейна Каспийского моря // Водные ресурсы. 2015. Т. 42, № 4. С. 442–452.

Раткович Д. Я. Современные колебания уровня Каспийского моря // Водные ресурсы. 1993. Т. 20, № 2. С. 160–171.

Румянцев В. А., Трапезников Ю. А. Стохастические модели гидрологических процессов. М.: Наука, 2008. 152 с.

Семенов В. А., Шелехова Е. А., Мохов И. И. и др. Роль Атлантического долгопериодного колебания в формировании сезонных аномалий температуры воздуха в Северном полушарии по модельным расчетам // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27, № 3 (302). С. 215–223.

Тужилкин В. С., Косарев А. Н., Архипкин В. С., Никонова Р. Е. Многолетняя изменчивость гидрологического режима Каспийского моря в связи с вариациями климата // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2011. № 2. С. 62–71.

Филатов Н. Н., Филатова И. В. Закономерности изменчивости внешнего водообмена и уровня крупных озер // Труды V Гидрологического Съезда. Л.: Гидрометеоиздат, 1990. С. 73–81.

Филатов Н. Н., Выручалкина Т. Ю., Дианский Н. А. и др. Внутривековая изменчивость уровня крупнейших озер России // Доклады Академии наук. 2016. Т. 467, № 5. С. 589–593.

Фролов А. В. Моделирование многолетних колебаний уровня Каспийского моря: теория и приложения. М.: ГЕОС, 2003. 174 с.

Angel J. R., Kunkel K. E. The response of Great Lakes water levels to future climate scenarios with an emphasis on Lake Michigan-Huron // Journal of Great Lakes Research, Supplement 2, 2009. Vol. 36. P. 51–58.

Arpe K., Roeckner E. Simulation of the hydrological cycle over Europe: Model validation and impacts of increasing greenhouse gases // Advances in Water Resources. 1999. Vol. 23, no. 2. P. 105–119.

Elguindi N., Giorgi F. Projected changes in the Caspian Sea level for the 21st century based on the latest AOGCM simulations // Geoph. Res. Letter. 2006. Vol. 33. L08706.

Gronewold A. D., Fortin V., Lofgren B. et al. Coasts, water levels, and climate change: A Great Lakes perspective // Climatic Change. 2013. 120. P. 697–711. doi: 10.1007/s10584-013-0840-2

IPCC, 2007: Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R. K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp. URL: http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/syr/en/contents.html (дата обращения: 10.08.2016).

IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [T. F. Stocker, D. Qin, G. K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P. M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 p. URL: <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/> (дата обращения: 10.08.2016).

Latif M., Roeckner E., Botzet M. et al. Reconstructing, monitoring, and predicting decadal-scale changes in the North Atlantic thermohaline circulation with sea surface temperature // *J. Climate*. 2004. Vol. 7. P. 1605–1614.

Leroy S. A. G., Arpe K. Glacial refugia for summer-green trees in Europe and South-West Asia as proposed by echam³ time-slice atmospheric model simulations // *Journal of Biogeography*. 2007. Vol. 34, no. 12. P. 2115–2128.

References

Anisimov O. A., Belolutskaia M. A., Lobanov V. A. Sovremennye izmeneniya klimata v oblasti vysokikh shirot Severnogo polushariya [Contemporary climate changes in the Northern Hemisphere high latitudes]. *Meteorologiya i gidrologiya [Meteorology and Hydrology]*. 2003. No. 1. P. 18–29.

Budyko M. I., Efimova H. A., Lobanov V. V. Budushchii uroven' Kaspiiskogo morya [Future level of the Caspian Sea]. *Meteorologiya i gidrologiya [Meteorology and Hydrology]*. 1988. No. 5. P. 86–94.

Filatov N. N., Filatova I. V. Zakonomernosti izmenchivosti vneshnego vodoobmena i urovnya krupnykh ozer [Variability patterns of the external water exchange and large lakes water level]. *Trudy V Gidrologicheskogo S'ezda [Proceed. of V Hydrological Congress]*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1990. P. 73–81.

Filatov N. N., Vyruchalkina T. Yu., Dianskii N. A., Nazarova L. E., Sinyukovich V. N. Vnutrивekovaya izmenchivost' urovnya krupneishikh ozer Rossii [Intrasecular variability in the level of Russia's largest lakes]. *Doklady Akademii nauk [Dokl. Earth Sci.]*. 2016. Vol. 467, no. 5. P. 589–593.

Frolov A. V. Modelirovanie mnogoletnikh kolebaniy urovnya Kaspiiskogo morya: teoriya i prilozheniya [Modeling the long-term fluctuations of the Caspian Sea level: theory and applications]. Moscow: GEOS, 2003. 174 p.

Golitsyn G. S., Dzyuba A. V., Osipov A. G., Panin G. N. Regional'nye izmeneniya klimata i ikh proyavleniya v sovremennom pod'eme urovnya Kaspiiskogo morya [Regional climate changes and their revealing in the contemporary rise of the Caspian Sea level]. *DAN SSSR*

Lofgren B. M., Hunter T. S., Wilbarger J. Effects of using air temperature as a proxy for potential evapotranspiration in climate change scenarios of Great Lakes basin hydrology // *J. Great Lakes Research*. 2011. Vol. 37. P. 744–752.

MacKay M., Seglenieks F. On the simulation of Laurentian Great Lakes water levels under projections of global climate change // *Climatic Change* 2013. Vol. 117 (12). P. 55–67.

Martin T., Ruprecht E. Decadal variation of the North Atlantic meridional heat transport and its relation to atmospheric processes // *Geophys. Res. Lett.* 2007. Vol. 34, L04703, doi: 10.1029/2006GL028438

Notaro M., Bennington V. Dynamical Downscaling – Based Projections of Great Lakes Water Levels // *J. of Climate*. 2015. Vol. 28, no. 24. P. 9721–9745. doi: 10.1175/JCLI-D-14-00847197210-9745

Rukhovets L. A., Filatov N. N. (Eds). Ladoga and Onego – Great European Lakes: Observation and Modeling. Springer-Praxis Publishing. 2010. 320 p.

The National Centers for Environmental Prediction (NCEP). URL: <http://www.ncep.noaa.gov> (дата обращения: 10.08.2016).

Поступила в редакцию 30.08.2016

[*Proceed. of the USSR Acad. of Sc.*]. 1990. Vol. 313, no. 5. P. 1224–1227.

Golitsyn G. S., Ratkovich D. Ya., Fortus M. I., Frolov A. V. O sovremennom pod'eme urovnya Kaspiiskogo morya [On the contemporary rise of the Caspian Sea level]. *Vodnye resursy [Water Resources]* 1998. Vol. 25, no. 2. P. 133–139.

Gruza G. V., Ran'kova E. Ya., Rocheva E. V. Izmeneniya klimata na territorii Rossii: temperatura vozdukhа i atmosferynye osadki [Climate change in Russia: air temperature and atmospheric precipitation]. In: *Izmenenie okruzhayushchei sredy i klimata: prirodnye i zvyazannye s nimi tekhnogennye katastrofy [Environment and climate change: natural and involved technogenic disasters]*. 2008. Vol. 6. P. 11–23.

Gusev A. V., Dianskii N. A. Vosproizvedenie tsirkulyatsii Mirovogo okeana i ee klimaticheskoi izmenchivosti v 1948–2007 gg. s pomoshch'yu modeli INMOM [Simulating of the World Ocean circulation and its climatic variability for 1948–2007 using the INMOM]. *Izv. RAN. Fiz. atm. i okeana [Izvestiya RAS, Atmospheric and Oceanic Physics]*. 2014. Vol. 50, no. 1. P. 3–15.

Klimat Karelii. Izmenchivost' i vliyanie na vodnye ob'ekty [Climate of Karelia: variability and influence on water bodies]. Ed. N. N. Filatov. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2004. 224 p.

Malinin V. N. Problema prognoza urovnya Kaspiiskogo morya [The Caspian Sea level forecast]. St. Petersburg: RGGMI, 1994. 160 p.

Meleshko V. P., Kattsov V. M., Mirvis V. M., Govorkova V. A., Pavlova T. V. Klimat Rossii v XXI veke. Chast' 1. Novye svidetel'stva antropogennogo izmene-

niya klimata i sovremennyye vozmozhnosti ego rascheta [Climate of Russia in the 21st century. Part 1. New evidence of human impact on climate change and the state of the art of its simulation]. *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and Hydrology]. 2008. No. 8. P. 5–19.

Monin A. S., Sonechkin D. M. Kolebaniya klimata [Climate fluctuations]. Moscow: Nauka, 2005. 192 p.

Mokhov I. I., Akperov M. G., Prokof'eva M. A., Timazhev A. V., Lupo A. R., Le Tret Je. Blokingi v Severnom polusharii i Evro-Atlanticheskom regione: ochenki izmenenij po dannym reanaliza i model'nym raschetam [Blockings in the Northern Hemisphere and Euro-Atlantic region: estimates of changes from reanalysis data and model simulations]. *Doklady Akademii nauk* [Dokl. Earth Sci.]. 2013. Vol. 449, no. 5. P. 582–585.

Panin G. N., Dianskii N. A. O svyazi kolebanii urovnya Kaspiiskogo morya i klimata Severnoi Atlantiki [On the connection between the Caspian Sea level and the North Atlantic climate]. *Izv. RAN. Fizika atmosfery i okeana* [Izvestiya RAS, Atmospheric and Oceanic Physics]. 2014. Vol. 50, no. 3. P. 304–316.

Panin G. N., Solomonova I. V., Vyruchalkina T. Yu. Klimaticheskie tendentsii v srednikh i vysokikh shirotakh Severnogo polushariya [Climatic trends in the middle and high latitudes of the Northern Hemisphere]. *Vodnye resursy* [Water Resources]. 2009. Vol. 36, no. 6. P. 743–756.

Panin G. N., Solomonova I. V., Vyruchalkina T. Yu. Rezhim sostavlyayushchikh vodnogo balansa Kaspiiskogo morya [Regime of water balance components of the Caspian Sea]. *Vodnye resursy* [Water Resources]. 2014. Vol. 41, no. 5. P. 488–495.

Panin G. N., Vyruchalkina T. Yu., Solomonova I. V. Vozdeistvie Severnoi Atlantiki na gidrologicheskii rezhim basseina Kaspiiskogo morya [Effect of the North Atlantic on the hydrological regime of the Caspian Sea Basin]. *Vodnye resursy* [Water Resources]. 2015. Vol. 42, no. 4. P. 442–452.

Ratkovich D. Ya. Sovremennyye kolebaniya urovnya Kaspiiskogo morya [Contemporary fluctuations of the Caspian Sea level]. *Vodnye resursy* [Water Resources]. 1993. Vol. 20, no. 2. P. 160–171.

Rumyantsev V. A., Trapeznikov Yu. A. Stokhasticheskie modeli gidrologicheskikh protsessov [Stochastic models of hydrologic processes]. Moscow: Nauka, 2008. 152 p.

Semenov V. A., Shelekhova E. A., Mokhov I. I., Zuev V. V., Koltermann K. P. Rol' Atlanticheskogo dologoperiodnogo kolebaniya v formirovaniy sezonnykh anomalii temperatury vozdukh v Severnom polusharii po model'nym raschetam [Role of the long-term Atlantic oscillation in the formation of seasonal air temperature anomalies in the Northern Hemisphere according to model calculations]. *Optika atmosfery i okeana* [Atmos. Ocean. Opt.]. 2014. Vol. 27, no. 3 (302). P. 215–223.

Tuzhilkin V. S., Kosarev A. N., Arkhipkin V. S., Nikonova R. E. Mnogoletnyaya izmenchivost' gidrologicheskogo rezhima Kaspiiskogo morya v svyazi s variatsiyami klimata [Long-term variability of the Caspian Sea hydrological regime in relation to climate variations]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya* [Moscow University Bulletin. Series 5: Geography]. 2011. No. 2. P. 62–71.

Volodin E. M., Dianskii N. A., Gusev A. V. Vosproizvedenie i prognoz klimaticheskikh izmenenii v XIX–XXI vekakh s pomoshch'yu modeli zemnoi klimaticheskoi sistemy IVM RAN [Simulation and prediction of climate changes in the 19th to 21st centuries with the Institute of Numerical Mathematics, Russian Academy of Sciences, model of the Earth's climate system]. *Izv. RAN. Fizika atmosfery i okeana* [Izvestiya RAS, Atmospheric and Oceanic Physics]. 2013. Vol. 49, no. 4. P. 379–400.

Volodin E. M. Predstavlenie potokov tepla, vlagi i impul'sa v klimaticheskikh modelyakh. Potoki s poverkhnosti [Representation of heat, moisture and momentum fluxes in climate models. Fluxes at surface]. *Fund. i prikl. klimatologiya* [Fundamental and Applied Climatology]. 2016. Vol. 1. P. 28–42.

Angel J. R., Kunkel K. E. The response of Great Lakes water levels to future climate scenarios with an emphasis on Lake Michigan-Huron. *Journal of Great Lakes Research*, Supplement 2, 2009. Vol. 36. P. 51–58.

Arpe K., Roeckner E. Simulation of the hydrological cycle over Europe: Model validation and impacts of increasing greenhouse gases. *Advances in Water Resources*. 1999. Vol. 23, no 2. P. 105–119.

Elguindi N., Giorgi F. Projected changes in the Caspian Sea level for the 21st century based on the latest AOGCM simulations. *Geoph. Res. Letter*. 2006. Vol. 33. L08706.

Gronewold A. D., Fortin V., Lofgren B., Clites A., Stow C. A., Quinn F. Coasts, water levels, and climate change: A Great Lakes perspective. *Climatic Change*. 2013. 120. P. 697–711. doi: 10.1007/s10584-013-0840-2

IPCC, 2007: Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R. K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp. URL: http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/syr/en/contents.html (accessed: 10.08.2016).

IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [T. F. Stocker, D. Qin, G. K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 p. URL: <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/> (accessed: 10.08.2016).

Latif M., Roeckner E., Botzet M., Esch M., Haak H., Hagemann S., Jungclaus J., Legutke S., Marsland S., Mikolajewicz U., Mitchell J. Reconstructing, monitoring, and predicting decadal-scale changes in the North Atlantic thermohaline circulation with sea surface temperature. *J. Climate*. 2004. Vol. 7. P. 1605–1614.

Leroy S. A. G., Arpe K. Glacial refugia for summer-green trees in Europe and South-West Asia as proposed by ecam³ time-slice atmospheric model simulations. *Journal of Biogeography*. 2007. Vol. 34, no. 12. P. 2115–2128.

Lofgren B. M., Hunter T. S., Wilbarger J. Effects of using air temperature as a proxy for potential evapotranspiration in climate change scenarios of Great Lakes basin hydrology. *J. Great Lakes Research*. 2011. Vol. 37. P. 744–752.

MacKay M., Seglenieks F. On the simulation of Laurentian Great Lakes water levels under projections of global climate change. *Climatic Change* 2013. Vol. 117 (12). P. 55–67.

Martin T., Ruprecht E. Decadal variation of the North Atlantic meridional heat transport and its relation to atmospheric processes. *Geophys. Res. Lett.* 2007. Vol. 34, L04703, doi: 10.1029/2006GL028438

Notaro M., Bennington V. Dynamical Downscaling – Based Projections of Great Lakes Water Levels.

J. of Climate. 2015. Vol. 28, no. 24. P. 9721–9745. doi: 10.1175/JCLI-D-14-00847197210-9745

Rukhovets L. A., Filatov N. N. (Eds). *Ladoga and Onego – Great European Lakes: Observation and Modeling.* Springer-Praxis Publishing. 2010. 320 p.

The National Centers for Environmental Prediction (NCEP). URL: <http://www.ncep.noaa.gov> (accessed: 10.08.2016).

Received August 30, 2016

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Выручалкина Татьяна Юрьевна

научный сотрудник, к. г. н.
Институт водных проблем РАН
ул. Губкина, 3, Москва, Россия, 119333
эл. почта: vyruchi@list.ru
тел.: +74991355374

Филатов Николай Николаевич

главный научный сотрудник, советник РАН, чл.-корр. РАН,
д. г. н., проф.
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: nfilatov@rambler.ru

Дианский Николай Ардадьевич

ведущий научный сотрудник, доцент,
д. ф.-м. н.
Институт вычислительной математики РАН
ул. Губкина, 8, Москва, Россия, 119333
эл. почта: nikolay.diansky@gmail.com
тел.: +79268206665

Гусев Анатолий Владимирович

старший научный сотрудник, к. ф.-м. н.
Институт вычислительной математики РАН
ул. Губкина, 8, Москва, Россия, 119333
эл. почта: anatoly.v.gusev@gmail.com
тел.: +79032467187

CONTRIBUTORS:

Vyruchalkina, Tatiana

Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences
3 Gubkin St., 119333 Moscow, Russia
e-mail: vyruchi@list.ru
tel.: +74991355374

Filatov, Nikolai

Northern Water Problems Institute,
Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk,
Karelia, Russia
e-mail: nfilatov@rambler.ru

Diansky, Nikolai

Institute of Numerical Mathematics,
Russian Academy of Sciences
8 Gubkin St., 119333 Moscow, Russia
e-mail: nikolay.diansky@gmail.com
tel.: +79268206665

Gusev, Anatoly

Institute of Numerical Mathematics,
Russian Academy of Sciences
8 Gubkin St., 119333 Moscow, Russia
e-mail: anatoly.v.gusev@gmail.com
tel.: +79032467187

УДК 556.554.4:551.326.85

ПЕРЕНОС ТЕПЛА В МАЛОМ ОЗЕРЕ В ПЕРИОД ЛЕДОСТАВА

**Н. И. Пальшин, Т. В. Ефремова, Р. Э. Здоровеннов,
Г. Э. Здоровеннова**

Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН

Исследована динамика теплового потока на границе вода – донные отложения и рассмотрены особенности переноса тепла в малом озере в течение периода ледостава. По данным измерений градиента температуры в придонном слое малого озера Вендюрского в зимние месяцы 1995–1999 гг. с использованием специального оборудования получены оценки теплового потока для разных периодов зимы и разных по глубине участков озера. Получены регрессионные уравнения, позволяющие оценивать величину теплопотока в зависимости от времени, глубины и придонной температуры. Анализ данных непрерывных измерений температуры в течение зимы 2007–2008 гг. в центральной части озера с высоким разрешением по пространству (2–5 см в придонных слоях и 0,5–1 м в водной толще) и времени (дискретность измерений одна минута) позволил проанализировать изменение теплосодержания столба воды в течение зимы. Предложена схема переноса тепла в малом озере, включающая, наряду с потоками из донных отложений в воду и из воды в лед, перенос тепла вдоль склонов с мелководий в области больших глубин. Установлено, что в первые два месяца ледостава в озере преобладает перенос тепла по склону дна в глубоководную котловину и постепенное заполнение ее теплой плотной водой. В январе – марте, когда поток тепла из донных отложений в воду и его перенос вдоль склона дна уменьшаются в несколько раз, начинает преобладать вертикальный перенос тепла в водной толще.

Ключевые слова: температура воды; мелководное озеро; период ледостава; теплопоток; перенос тепла; диффузия; наклонное дно; склоновое течение.

**N. I. Palshin, T. V. Efremova, R. E. Zdorovenov, G. E. Zdorovennova.
HEAT TRANSFER IN AN ICE-COVERED SMALL LAKE**

Heat flux dynamics at the water-sediment interface is considered in the article. Features of heat transfer in a small lake during the freeze-up period are discussed. The heat flux was estimated for different winter months and different depth areas of the lake using temperature gradient measurements in the near-bottom layer of small lake Vendyurskoe in the winters of 1995–1999. Regression equations to calculate the heat flux as a function of time, depth and near-bottom temperature were obtained. Analysis of continuous temperature measurement data for the winter 2007–2008 in the central part of the lake with high spatial (2–5 cm in near-bottom layers and 0.5–1 m in the water column) and temporal (1-min step) resolution allowed analyzing the change in the heat content of the water column during the winter. A circuit of heat transfer in a small lake which, along with the sediment-to-water and water-to-ice heat fluxes, includes heat transfer along the slopes from shallow to deep – water areas is suggested. It was found that during the first two months under ice prevalent heat transfer is along the slope to the profundal zone, so that it is gradually filled with denser warm water. Vertical heat transport in the water column

begins to dominate in January–March, when the heat flux from sediment to water and its transfer along the slope drop severalfold.

Key words: water temperature; shallow lake; heat flux; ice-covered period; heat transfer, diffusion, sloping bottom, along-slope current.

Введение

Традиционно считается, что в течение периода ледостава теплосодержание и термическая структура мелководных озер обуславливаются главным образом двумя потоками тепла: из донных отложений в воду и из воды в лед [Бояринов, Петров, 1991]. Обычно температура воды в озере в течение зимы увеличивается, то есть поток тепла из донных отложений в воду преобладает над его потерями [Kirillin et al., 2012]. Теплосодержание озера в момент установления льда зависит от погодных условий предледоставного периода [Bengtsson et al., 1995; Петров и др., 2006]. В озерах со значительной проточностью важную роль играет адвекция тепла за счет притока и стока вод. В конце зимы, когда снежный покров исчезает, изменения теплосодержания определяются преимущественно проникновением солнечной радиации в воду и возрастающим потоком тепла из воды в лед. Совместный анализ изменения теплосодержания столба воды и разницы тепловых потоков из донных отложений в воду и из воды в лед показывает убыль тепла на мелководных участках и прибавку в глубоководных частях небольших озер в течение зимы [Zdrovennova, 2009].

Настоящая работа посвящена изучению особенностей теплового режима небольшого покрытого льдом озера Вендюрского (юг Карелии). В работе приведены результаты измерений температуры воды в придонном слое и водной толще озера в зимние месяцы 1995–1999 и 2007–2008 гг. Рассмотрены особенности изменения теплового потока, направленного из донных отложений в воду, а также предложена схема переноса тепла в озере в течение зимы.

Материалы и методы

Озеро Вендюрское (62°10'–62°20' с. ш., 33°10'–33°20' в. д.) относится к бассейну реки Суны, впадающей в Онежское озеро. Его котловина имеет ледниковое происхождение и вытянута с запада на восток. Длина озера 7 км, наибольшая ширина 1,5 км, площадь 10,5 км², средняя глубина 5,3 м, наибольшая 13,4. У берегов и на прибрежных склонах до глубины 2–2,5 м встречаются преимущественно

песчаные грунты, на глубинах 2–4 м дно покрыто в основном илистыми грунтами коричневой окраски, иногда с примесью песка и руды. Более глубокие части водоема покрыты илами темно-коричневого цвета. По гранулометрическому составу преобладают мелкоалевритовые илы. Мощность иловой толщи находится в пределах 0,4–0,9 м, а в отдельных углублениях дна превышает метр [Литинская, Поляков, 1975].

В летний период нагревание озера осуществляется в условиях слабой стратификации или гомотермии [Гавриленко и др., 2014]. Из-за небольших глубин в озере создаются благоприятные условия для прогревания донных отложений и аккумуляции ими тепла. Осенью и зимой донные отложения возвращают тепло в водную толщу, а у дна часто наблюдается пограничный слой с повышенными градиентами температуры, растворенных солей и плотности воды [Malm et al., 1997a, b, c; Maher et al., 1999].

Оценки величины теплового потока, направленного зимой из донных отложений в воду, были выполнены по данным измерений градиента температуры в верхнем десятисантиметровом слое донных отложений оз. Вендюрского: в декабре 1994 г. – на 8 станциях; в феврале 1995 г. – на 10 станциях; в марте и апреле 1995 г. – на 18 станциях; в ноябре и декабре 1995 г. и в марте и апреле 1996 г. – на 12 станциях; в декабре 1996 г. – на 13 станциях, в апреле 1997 г. – на 33 станциях; в декабре 1998 г. и марте 1999 г. – на 40 станциях и в апреле 1999 г. – на 15 станциях. Всего – 243 измерения, которые были выполнены прибором, разработанным в ИВПС КарНЦ РАН А. М. Глинским [Malm et al., 1996]. Глубина погружения зонда в верхнем слое донных отложений фиксировалась с помощью подвижного диска, лежащего на поверхности дна, а температура – двумя термисторами, разнесенными на 10 см по глубине.

Предполагается, что в верхнем 10-см слое донных отложений теплоперенос является молекулярным. Поэтому поток тепла из донных отложений в воду (Q_s) может быть оценен с использованием широко известного градиентного метода:

$$Q_s = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z}, \quad (1)$$

где T – температура, °C; z – вертикальная координата, м; λ – коэффициент теплопроводности донных отложений, Вт·м⁻¹·°C⁻¹.

Для оценки коэффициента теплопроводности разных типов грунтов использовалось полуэмпирическое приближение, основанное на величинах пористости и содержания кварца, который имеет более высокую теплопроводность, чем другие вещества, содержащиеся в донных отложениях [Malm et al., 1997a, c]:

$$\lambda = \lambda_w^p \lambda_s^{(1-p)} \quad (2)$$

где $\lambda_s = 7.7^q 2.0^{(1-q)}$, p – пористость (или доля воды), q – доля содержания кварца в твердой части донных отложений, индексы w и s относятся к воде и седиментам соответственно.

На десяти станциях в оз. Вендюрском были отобраны пробы верхнего 10-см слоя илистых отложений [Malm et al., 1997a]. Ненарушенную колонку с песчаными отложениями стратометром отобрать не удалось. Все отобранные образцы илов имели очень высокую естественную влажность с содержанием воды от 91 до 97 % (по результатам выпаривания). Таким образом, пористость p для большинства образцов была выше 0,95. Твердый материал донных отложений разделялся на минеральную и органическую части. Содержание органического вещества определялось по результатам потерь при прокаливании, которые составляли около 30 % от общего веса твердого материала. По данным П. А. Лозовика [1991], в результате прокалывания 70 % потерь относится к сжиганию органического вещества, а 30 % приходится на разрушение минеральных веществ. Таким образом, в твердой фазе донных отложений содержание органического вещества с самой низкой теплопроводностью составляет в среднем около 20 %. Минеральная часть в свою очередь разделялась на содержание кварца и других твердых материалов с более низкой теплопроводностью по сравнению с ним. Содержание кварца для органической части твердого материала было принято равным нулю, а для минеральной ~50 % [Malm et al., 1997a].

Из-за высокого содержания воды в илистых отложениях оз. Вендюрского рассчитанные коэффициенты теплопроводности были всего на 5 % больше, чем у воды (при температуре 0 °C, $\lambda_w = 0,569$ Вт·м⁻¹·°C⁻¹). Для станций вблизи берегов, где в илах присутствовала примесь песка, а естественная влажность составляла 91–94 %, рассчитанные коэффициенты теплопроводности донных отложений были выше, чем у воды, на 12–19 %. На мелководье (до 2–4 м) в верхнем слое донных отложений оз. Вендюрского часто встречается заиленный

песок. Если при измерениях в илистых отложениях термошуп легко погружался в ил под собственным весом и его приходилось фиксировать от дальнейшего погружения за кабель к поверхности льда, то в случаях с плотным грунтом датчики приходилось забивать. В записях делались пометки о твердом грунте. Песчаные донные отложения из-за меньшего содержания воды и высокого содержания кварца должны иметь большую теплопроводность, чем илистые. Оценки коэффициентов теплопроводности для уплотненного грунта (с влажностью от 50 до 40 %) составляли от 1,5 до 1,8 Вт·м⁻¹·°C⁻¹. В работе [Malm et al., 1997a] приводятся значения 1,4–2,2 Вт·м⁻¹·°C⁻¹, что в среднем в три раза больше, чем для воды. Эти данные согласуются с прямыми измерениями коэффициентов теплопроводности для различных типов грунтов в Рыбинском водохранилище [Буторин и др., 1982], значения которых изменялись в 3–5 раз в зависимости от максимальной молекулярной влагоемкости, объемного веса и содержания органики (от торфа до песка). Таким образом, когда при измерениях на станциях встречался твердый грунт, мы использовали поправку 2–2,5 к молекулярному коэффициенту теплопроводности воды, что было бы характерно для заиленного песка.

Изменение теплосодержания столба воды единичной площади в любом районе озера обуславливается потоками тепла, направленными из донных отложений в воду, из воды в лед и адвективным переносом тепла. Изменение содержания тепла (ΔH_i) в любом горизонтальном слое озера (i) в единицу времени (Δt) можно представить в виде простой схемы (рис. 1) и описать уравнениями:

$$\frac{\Delta H_i}{\Delta t} = B_i - F_{z-\Delta z} + F_z + A_{z-\Delta z} - A_z, \quad (3)$$

$$B_i = Q_{s,i} (S_{z-\Delta z} - S_z),$$

$$F_z = Q_{w,z} S_z = \lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial z} S_z,$$

где S_z – площадь дна озера ниже вертикальной компоненты z , м²; λ_{eff} – эффективный коэффициент теплопроводности, Вт·м⁻¹·°C⁻¹; T – температура воды, °C; F_z и $Q_{w,z}$ – интегральный вертикальный перенос тепла и средний поток через горизонтальное сечение озера на горизонте z ; B_i и $Q_{s,i}$ – поступление и средний поток тепла из донных отложений в воду в i -м слое (от $z-\Delta z$ до z); A_z – адвективный перенос тепла вдоль наклонного дна из одного слоя в другой. Скорости изменения содержания тепла в слоях озера и переносы через горизонтальные сечения выражены в Дж·с⁻¹, а потоки тепла в Вт·м⁻².

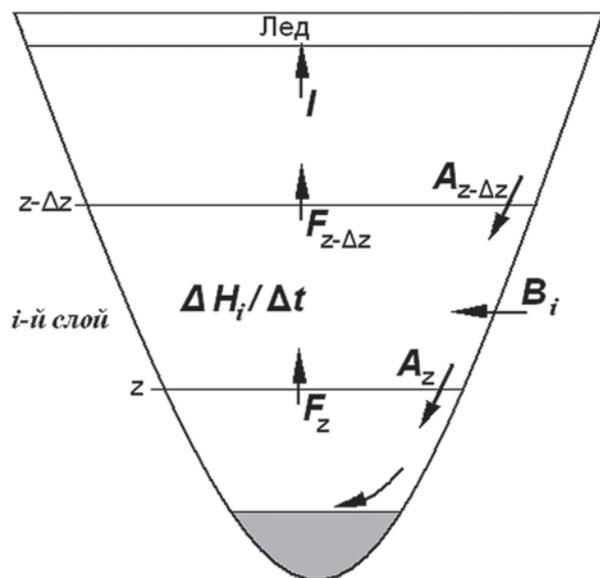


Рис. 1. Схема переноса тепла в мелководном малопотоковом озере зимой

Изменение тепла в озере от нижней поверхности льда до горизонта z можно представить в виде:

$$\sum_i \frac{\Delta H_i}{\Delta t} = \sum_i B_i - I + F_z - A_z, \quad (4)$$

а в целом для всего озера:

$$\sum_i \frac{\Delta H_i}{\Delta t} = \sum_i B_i - I, \quad (5)$$

где I – поток тепла из воды в лед. В соответствии с наблюдениями на оз. Вендюрском [Malm et al., 1996, 1997a], его средние значения по съемкам в разные зимние месяцы (ноябрь–март) менялись мало и составляли от 0,5 до 0,7 Вт·м⁻².

Скорость изменения содержания тепла по слоям была рассчитана по данным измерений температуры воды на термокесе, размещенной в центральной части озера зимой 2007–2008 гг. При измерениях использовались автономные датчики температуры производства канадской фирмы «RBR Ltd» (точность $\pm 0,002$ °С, разрешение $< 0,00005$ °С). Датчики располагались в водной толще через 1–1,5 м и через 2–5 см в придонных слоях. Коса была установлена до образования ледового покрова и снята после очищения озера ото льда. Дискретность измерений составляла одну минуту. Полученные данные свидетельствовали, что зимой на фоне сезонного роста температуры воды на горизонтах наблюдались флуктуации разной периодичности, достигающие сотых, а иногда и десятых долей градуса. Причиной этих колебаний могли быть атмосферные воздействия, генерирующие бароклинные

и баротропные сейши, а также адвективный перенос тепла [Бояринов и др., 2003; Петров и др., 2007; Bengtsson et al., 1996; Malm et al., 1998]. Данные измерений температуры воды показывают, что в течение первого месяца ледостава изменение теплосодержания в придонном слое озера не может быть объяснено молекулярной диффузией. Оценки коэффициента эффективной теплопроводности превышают молекулярный уровень на два порядка [Петров и др., 2006]. Для исключения влияния флуктуаций разной периодичности на сезонный тренд температуры, учитывающий эффективный перенос тепла, расчет изменения теплозапаса осуществлялся по сглаженным данным с периодом осреднения 10 суток.

Результаты

Поток тепла на границе вода-дно. В течение зимы тепло, накопленное донными отложениями на этапе летнего нагревания, постепенно истощается, и величина теплового потока на границе вода-дно уменьшается. Потоки тепла, направленные из донных отложений в воду, на всех станциях во время всех съемок изменялись в пределах от 0,5 до 6,5 Вт·м⁻² (рис. 2). Они как изменялись по акватории озера, так и уменьшались со временем в течение зимы. Наиболее высокие значения потоков тепла наблюдались в мелководных районах озера в начале зимы, с увеличением глубины они постепенно уменьшались (рис. 2, а). Меньшие величины теплового потока в глубоких частях озера могут объясняться меньшим накоплением тепла донными отложениями летом по сравнению с мелководными районами. Кроме того, в глубоководных частях водоема в начальный период ледостава наблюдается резкий рост придонной температуры [Петров и др., 2006], вследствие чего быстрее, чем на мелководьях, уменьшается ее градиент на границе вода-дно и величина теплопотока уменьшается. В песчаных донных отложениях вертикальные градиенты температуры были меньше, чем в илах, однако на потоки тепла это различие типов грунтов влияло мало, так как теплопроводность их значительно выше.

Межгодовая изменчивость потоков тепла из донных отложений в воду относительно небольшая (рис. 2). Об этом говорят высокие коэффициенты корреляции и детерминации при аппроксимации данных из разных лет в одной выборке. Это позволяет использовать полученные регрессионные уравнения (6) и (7) для любого года, не учитывая небольшую погрешность из-за межгодовой изменчивости:

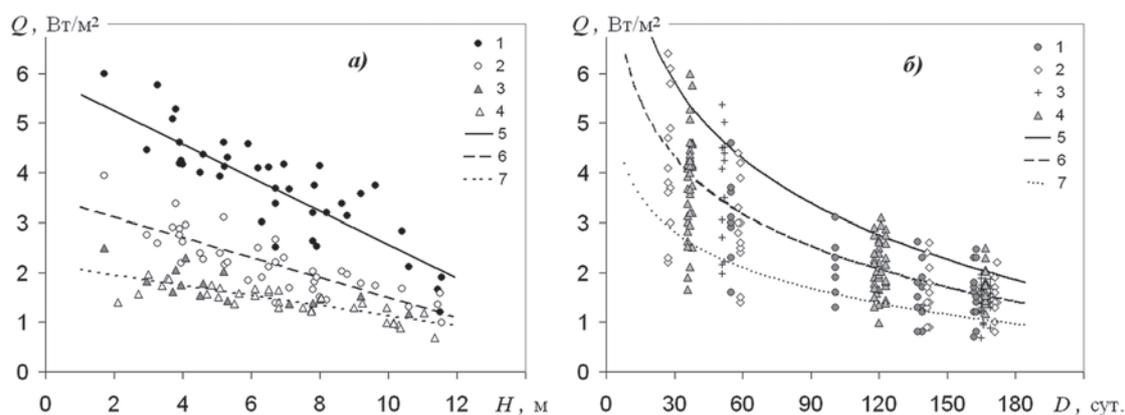


Рис. 2. Зависимость потока тепла, направленного из донных отложений в воду, от глубины (а) и времени (б) в оз. Вендюрском для периода ледостава: а) 1 – 6–8 декабря 1998 г., 2 – 26 февраля – 3 марта 1999 г., 3 – 16 апреля 1999 г., 4 – 14–16 апреля 1997 г., 5–7 – линейная аппроксимация данных; б) 1 – 1994–1995 г., 2 – 1995–1996 г., 3 – 1996–1997 г., 4 – 1998–1999 г., 5–7 – аппроксимация данных по уравнению (6) для горизонтов 2, 6, 10 м соответственно

$$Q_s = 1,89 + 7,95 e^{-0,017D} - 0,47 h e^{-0,017D} - 0,1h, \quad (6)$$

(±0,45 R=0,93)

$$Q_s = 1,84 + 9,14 e^{-0,017D} - 1,62 T_z e^{-0,017D} - 0,17 T_z, \quad (7)$$

(±0,46 R=0,93)

где h – глубина, м; D – число дней от 1 ноября; T_z – температура на границе вода-дно на разных глубинах от 1,5 до 11,3 м, °С. В уравнениях последовательность предикторов приведена по мере убывания их значимости. В скобках даны среднеквадратические отклонения и коэффициенты корреляции.

Как показал регрессионный анализ, в соответствии со значениями среднеквадратических отклонений, коэффициентов корреляции и детерминации, использование числа дней от календарной даты 1 ноября в уравнении (6) предпочтительнее, чем от даты установления ледового покрова. Например, в 1994 и 1995 г. лед установился 7 ноября, а в 1996 г. – 12 декабря. Ко второй декаде декабря в 1996 г. значительная часть тепла донных отложений была уже израсходована на нагревание воды и потери тепла в атмосферу, что привело к меньшим потокам тепла из осадков, чем в другие годы, если использовать в расчетах дату после установления льда. Ледовый покров на оз. Вендюрском обычно устанавливается при понижении температуры в основной водной толще (от 2 до 11 м) до 1–1,5 °С. В экстремальных метеорологических условиях он может образоваться как при 0, так и при 2 °С. Это оказывает влияние на межгодовую изменчивость зимней термической структуры. В этих случаях при известных значениях температуры воды на горизонтах можно использовать уравнение (7).

С июля 2007 г. стали проводиться непрерывные измерения температуры через 2 см на

границе вода-дно в центральной глубоководной (>11 м) части оз. Вендюрского с помощью придонной платформы, оснащенной датчиками температуры и давления канадской фирмы «RBR Ltd». Данные детально рассмотрены в работе [Гавриленко и др., 2015]. Показано, что с появлением сплошного ледового покрова значения потока тепла вблизи границы вода-дно уменьшаются до 2–4 Вт·м⁻², затем в течение месяца снижаются до 1–2 Вт·м⁻², а в дальнейшем в течение зимы не превышают 1 Вт·м⁻². Эти изменения близко соответствуют кривой 7 на рис. 2 (б) для горизонта 10 м.

Перенос тепла в озере. Анализ данных пространственных съемок в зимние сезоны 1994–1995 гг. доказал наличие горизонтального переноса тепла и солей из мелководных областей в глубоководную часть оз. Вендюрского. Они имели тот же порядок, что и разница между потоками тепла и солей, которые наблюдались на границах воды с донными отложениями и льдом [Malm et al., 1996, 1997a]. Однако не было показано, как происходит перераспределение тепла и солей в водной толще озера по вертикали.

По данным измерений температуры воды на горизонтах высокоточными приборами в зимний сезон 2007–2008 гг. были рассчитаны изменения тепла по слоям в центральной глубоководной части озера. Потоки из донных отложений в воду оценивались по формуле (6), поток из воды в лед для акватории озера был принят постоянным 0,6 Вт·м⁻². На рисунке 3 показано сопоставление скорости изменения содержания тепла в озере в течение подледного периода 2007–2008 гг. (вычисленной по измерениям на термокесе) по сравнению с величиной разности потоков тепла на границах

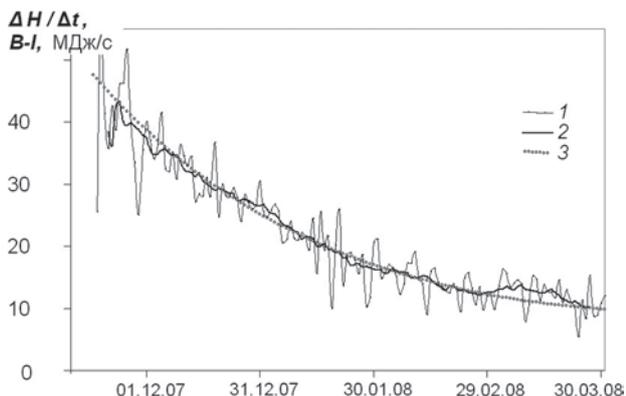


Рис. 3. Скорость изменения содержания тепла в озере зимой 2007–2008 гг.: 1 – среднесуточные значения, 2 – средние декадные значения, 3 – разница потоков тепла из донных отложений в воду и из воды в лед по среднемноголетним данным, уменьшенная на 3 %

вода-дно и вода-лед, рассчитанных по формулам (3) и (6). Различие между ними по декадным данным в среднем не превышает 3 %, т. е. зимний сезон 2007–2008 гг. по потокам тепла был лишь немного холоднее по сравнению со среднемноголетними данными.

Неизвестными в уравнениях (3) и (4) остаются A_z и F_z . Решить системы уравнений по горизонтам или слоям без определенных допущений невозможно, т. к. количество неизвестных больше количества уравнений и нет адекватных оценок для эффективного коэффициента теплопроводности. В данном случае, используя натурные данные, можно рассмотреть изменения разности вертикального и адвективного переносов тепла (в соответствии с формулой (4)) на протяжении всего периода ледостава (рис. 4).

Отрицательные значения разности ($F_z - A_z$) на рисунке 4 указывают на то, что в начале зимы адвективный перенос тепла больше эффективного вертикального переноса тепла через горизонтальные сечения озера на всех горизонтах. Максимальные его значения наблюдаются на средних глубинах, где происходит основной транзит тепла из мелководий в глубоководную часть озера. С определенной уверенностью можно говорить, что адвективный перенос тепла происходит вниз вдоль наклонного дна и представляет собой склоновое течение. Подтверждением служит то, что в основной водной толще изотермы в результате силы плавучести Архимеда стремятся выровняться и располагаются почти горизонтально, а в придонных слоях обычно наблюдаются повышенные градиенты температуры и солей в результате обмена

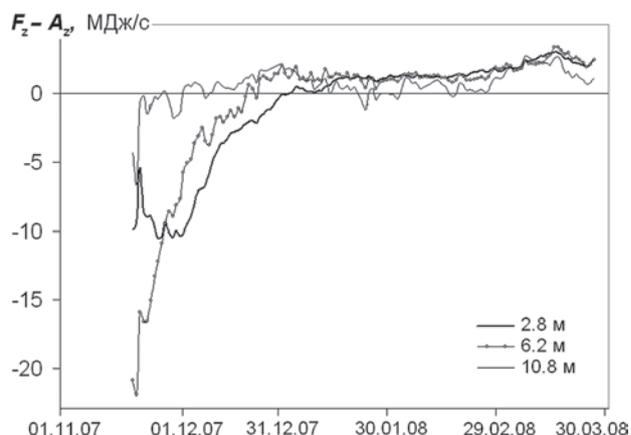


Рис. 4. Разница вертикального потока тепла внутри водной толщи (F_z) и потока за счет адвекции по уклону дна (A_z) через горизонтальные поверхности на трех горизонтах. Зима 2007–2008 гг., центральная часть озера, глубина станции 11,3 м

с донными отложениями, что приводит к образованию относительно тяжелой воды. После заполнения центрального углубления дна озера уже к началу декабря наиболее плотной водой (с температурой, близкой к температуре наибольшей плотности, и повышенной минерализацией) тепло, поступающее из донных отложений, начинает перераспределяться на меньших глубинах. На средних глубинах (5,3–6,2 м) наибольшая скорость прироста тепла запаздывает относительно максимальных глубин примерно на 20 суток и наблюдается в первой половине декабря (рис. 4, 5). В этот период на верхних горизонтах еще доминирует вынос тепла по уклону дна, и прирост теплозапаса в слое по сравнению с поступлением из донных отложений здесь отрицательный (рис. 5). Таким образом, в первой половине зимы происходит постепенное послойное заполнение глубоководной котловины озера наиболее плотной теплой водой.

Уже в январе поступление тепла в воду из донных отложений уменьшается в 2–3 раза и замедляется скорость роста теплозапаса слоев (рис. 3). Интегральные вертикальные переносы тепла через поперечные сечения в озере F_z на всех горизонтах становятся больше A_z (положительные значения разности ($F_z - A_z$) на рис. 4). К этому времени усиливается вертикальная термическая стратификация, и основное перераспределение тепла, поступающего из донных отложений, может происходить в виде переноса его от мелководных районов к центру озера по слегка наклоненным изопикнам.

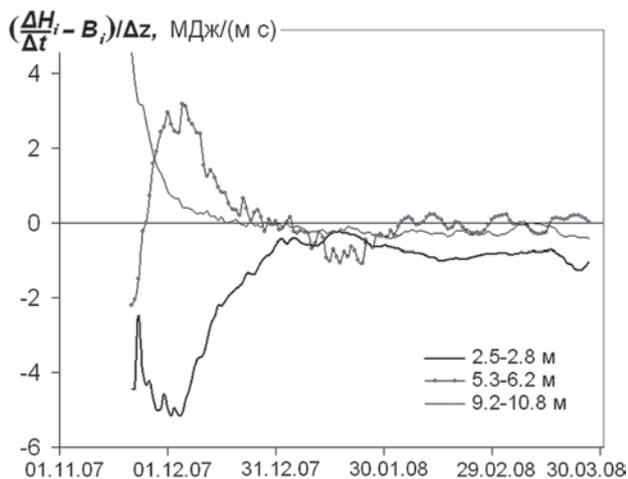


Рис. 5. Разница изменения скорости теплосодержания и потока тепла из донных отложений в воду в верхнем (глубины 2,5–2,8 м), среднем (глубины 5,3–6,2 м) и нижнем (глубины 9,2–10,8 м) слоях, отнесенная к слою толщиной 1 м

Обсуждение результатов

Результаты приведенных расчетов показывают, что в небольшом бореальном озере в зимний период существует перенос тепла из мелких районов в глубоководную часть вдоль уклона дна. Склоновые течения имеют малые скорости, но вносят существенный вклад в формирование зимней вертикальной термической структуры озера. Для оз. Вендюрского в работе [Malm, 1998] были сделаны оценки толщины пограничного слоя вдоль подводного склона (0,1–0,2 м) и скоростей склонового течения (от 2 до 7 мм с⁻¹ в ноябре-декабре и на порядок меньше в марте-апреле). В результате придонного склонового течения в центральной глубоководной части озера образуется избыток, а на мелководьях недостаток воды, что может приводить к компенсационному течению в верхнем слое. Подтверждением этому могут служить данные по пространственному распределению электропроводности воды в оз. Вендюрском в первой декаде декабря 1998 г. [Бояринов и др., 2003]. При нарастании ледового покрова выделяются соли непосредственно под лед. Через месяц после его образования (толщина кристаллического льда 21–26 см) в верхнем слое до 5 м в центральной глубоководной части озера находилось меньше 40 % солей, выделившихся при образовании льда, а в мелководных районах – от 140 до 180 %. Изолиния 100 % была расположена над глубинами, близкими к средней глубине. Это косвенно свидетельствовало о присутствии дивергенции течения в верхнем слое озера. Рассмотренный механизм переноса тепла в оз. Вендюрском

может служить примером для многих бореальных озер, водные толщи которых зимой нагреваются в результате теплообмена с донными отложениями [Россинский, 1975; Буторин и др., 1982; Тихомиров, 1982; Пальшин, 1999].

На основе теоретических оценок, в случае непроницаемости дна для потоков тепла и соли в пограничных слоях пресноводных озер в течение всего года должны преобладать восходящие склоновые течения [Зырянов, 2012]. Зимой при температуре воды ниже 4 °С из-за более интенсивной диффузии в пограничных слоях вода охлаждается, становится легче, и в результате силы плавучести Архимеда происходит ее подъем вдоль берегового склона, а в определенных условиях образуется даже пальцевая конвекция. Также было отмечено [Зырянов, 2012], что «локальные движения в диффузионных пограничных слоях вдоль берегового склона становятся источником глобального поперечного перемешивания вод во всем водоеме». Определенный вклад в вертикальную циркуляцию вод могут вносить сейши, которые являются основным механизмом передачи импульса энергии от атмосферы в озеро, покрытое льдом [Bengtsson et al., 1996; Malm et al., 1998; Бояринов и др., 2003; Петров и др., 2007]. Сейши генерируют остаточные течения, нисходящие в пучностях стоячих волн, и компенсационные восходящие потоки в узловых линиях [Зырянов, 2011]. Условия, близкие к непроницаемости дна для потоков тепла и соли в пограничных слоях, и восходящие склоновые течения могут иметь место в крупных глубоких озерах, водные массы которых после установления ледового покрова выхолаживаются из-за потерь тепла в атмосферу [Тихомиров, 1982]. Донные отложения в таких озерах из-за термоклима летом прогреваются слабо, а в течение очень продолжительного предледоставного периода теряют почти весь свой накопленный теплоспас, особенно быстро с наличием песчаных грунтов на мелководных участках дна.

Заключение

Анализ данных многолетних измерений температуры водной толщи и придонного слоя небольшого мелководного оз. Вендюрского в зимний период позволил оценить величину теплового потока, направленного из донных отложений в воду. Получены регрессионные уравнения, позволяющие рассчитывать величину теплотока в зависимости от времени, глубины и придонной температуры.

Анализ изменения теплосодержания столба воды в течение зимы и оценка теплотоков

на границах водной толщи с донными отложениями и льдом позволили предложить схему переноса тепла в озере зимой, включающую, наряду с потоками из донных отложений в воду и из воды в лед, адвективный перенос. Показано, что в первые два месяца ледостава в озере преобладает склоновый перенос тепла, поступающего в воду из донных отложений, направленный из мелководий в глубоководную часть, и происходит постепенное последовательное заполнение котловины теплой, наиболее плотной водой. В январе–марте поток тепла из донных отложений и его перенос вдоль склона дна уменьшается, и начинает доминировать вертикальный перенос тепла в водной толще.

Литература

- Бояринов П. М., Петров М. П. Процессы формирования термического режима глубоких пресноводных водоемов. Л.: Наука, 1991. 175 с.
- Бояринов П. М., Митрохов А. В., Пальшин Н. И. и др. Динамика вод в малом озере в период ледостава // Гидроэкологические проблемы Карелии и использование водных ресурсов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2003. С. 24–32.
- Буторин Н. В., Курдина Т. Н., Бакастов С. С. Температура воды и грунтов Рыбинского водохранилища. Л.: Наука, 1982. 224 с.
- Гавриленко Г. Г., Здоровеннова Г. Э., Здоровеннов Р. Э. и др. Термический и кислородный режимы мелководного озера на этапе летнего нагревания // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2014. 10 (1). С. 414–421.
- Гавриленко Г. Г., Здоровеннова Г. Э., Здоровеннов Р. Э. и др. Теплоток на границе вода – донные отложения в небольшом озере // Труды КарНЦ РАН. 2015. № 9. С. 3–9.
- Зырянов В. Н. Сейши подо льдом // Водные ресурсы. 2011. Т. 38, № 3. С. 259–271.
- Зырянов В. Н., Лапина Л. Э. Склоновые течения в морях, озерах и водохранилищах, обусловленные диффузионными эффектами // Водные ресурсы. 2012. Т. 39, № 3. С. 292–303.
- Литинская К. Д., Поляков Ю. К. Озера Вендюрской группы – Урос, Риндозеро, Вендюрское // Водные ресурсы Карелии и их использование. Петрозаводск: Карельский филиал АН СССР, 1975. С. 57–66.
- Лозовик П. А. Химический состав взвеси, твердой и жидкой фракции илов и обменные процессы «вода-дно» // Поверхностные воды озерно-речной системы Шуи в условиях антропогенного воздействия. Петрозаводск, 1991. С. 114–118.
- Пальшин Н. И. Термические и гидродинамические процессы в озерах в период ледостава. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 1999. 86 с.
- Петров М. П., Терзевик А. Ю., Здоровеннов Р. Э., Здоровеннова Г. Э. Особенности термической структуры мелководного озера в начале зимы // Водные ресурсы. 2006. Т. 33, № 2. С. 135–143.
- Петров М. П., Терзевик А. Ю., Здоровеннов Р. Э., Здоровеннова Г. Э. Движения воды в мелководном озере, покрытом льдом // Водные ресурсы. 2007. Т. 34, № 2. С. 131–140.
- Россинский К. И. Термический режим водохранилищ. М.: ИВП АН СССР, 1975. 167 с.
- Тихомиров А. И. Термика крупных озер. Л.: Наука, 1982. 232 с.
- Bengtsson L., Malm J., Terzhevik A., Petrov M. et al. A Field Study of Thermo- and Hydrodynamics in a Small Karelian Lake during Late Winter 1994. Report 3185, Lund University, Sweden, 1995. 72 p.
- Bengtsson L., Malm J., Terzhevik A. et al. Field investigation of winter thermo- and hydrodynamics in a small Karelian lake // Limnol. Oceanogr. 1996. Vol. 41, no. 7. P. 1502–1513.
- Kirillin G., Leppäranta M., Terzhevik A. et al. Physics of seasonally ice-covered lakes: a review // Aquatic Sciences. 2012. 74 (4). P. 659–682.
- Maher O. A., Malm J., Terzhevik A. et al. Temperature and Hydrodynamics in Lake Vendyurskoe during Winter 1996/1997 and 1997/1998. Report 3223, Lund University, Sweden, 1999. 145 p.
- Malm J. Bottom buoyancy layer in an ice-covered lake // Water Resources Res. 1998. Vol. 34, no. 11. P. 2981–2993.
- Malm J., Terzhevik A., Bengtsson L. et al. A Field Study of Thermo- and Hydrodynamics in Three Small Karelian Lake during Winter 1994/1995. Report 3197, Lund University, Sweden, 1996. 220 p.
- Malm J., Terzhevik A., Bengtsson L. et al. A field study on currents in a shallow ice-covered lake // Limnol. Oceanogr. 1998. Vol. 43, no. 7. P. 1669–1679.
- Malm J., Terzhevik A., Bengtsson L. et al. Temperature and Hydrodynamics in Lake Vendyurskoe during Winter 1995/1996. Report 3213, Lund University, Sweden, 1997a. 207 p.
- Malm J., Terzhevik A., Bengtsson L. et al. Temperature and Salt Content Regimes in Three Shallow Ice-Covered Lakes: 1. Temperature, Salt Content and Density Structure // Nordic Hydrology. 1997b. Vol. 28. P. 99–128.
- Malm J., Terzhevik A., Bengtsson L. et al. Temperature and Salt Content Regimes in Three Shallow Ice-Covered Lakes: 2. Heat and Mass Fluxes // Nordic Hydrology. 1997c. Vol. 28. P. 129–152.
- Zdorovenнова G. E. Spatial and temporal variations of the water-sediment thermal structure in shallow ice-covered Lake Vendyurskoe (Northwestern Russia) // Aquatic Ecology. 2009. Vol. 43. P. 629–639. doi: 10.1007/s10452-009-9277-0

Поступила в редакцию 05.04.2016

References

- Boyarinov P. M., Petrov M. P. Protsessy formirovaniya termicheskogo rezhima glubokih presnovodnykh vo-doomov [The formation of thermal regime in deep fresh-water bodies]. Leningrad: Nauka, 1991. 175 p.
- Boyarinov P. M., Mitrohov A. V., Palshin N. I., Petrov M. P., Terzhevik A. Yu., Filatov N. N. Dinamika vod v malom ozere v period ledostava [The dynamics of water in a small lake during the ice-covered period]. Gidroekologicheskiye problemy Karelii i ispolzovaniye vodnykh resursov [Hydroecological problems of Karelia and the use of water resources]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2003. P. 24–32.
- Butorin N. V., Kurdina T. N., Bakastov S. S. Temperatura vody i gruntov Rybinskogo vodohranilishcha [Water and soil temperature in the Rybinsk Reservoir]. Leningrad: Nauka, 1982. 224 p.
- Gavrilenko G. G., Zdorovenova G. E., Zdorovenov R. E., Palshin N. I., Terzhevik A. Yu. Termicheskiy i kislородnyi regimiy melkovodnogo ozera na etape letnego nagrevaniya [Thermal and oxygen regimes of a shallow lake at the stage of summer heating]. *Geopolitika i ekogeodinamika regionov [Geopolitics and Ecogeodynamics of regions]*. 2014. No. 10 (1). P. 414–421.
- Gavrilenko G. G., Zdorovenova G. E., Zdorovenov R. E., Palshin N. I., Mitrohov A. V., Terzhevik A. Yu. Teplopotok na granice voda-donnye otlozheniya v nebolshom ozere [Heat flux at the water-sediment interface in a shallow lake]. *Trudy KarNC RAN [Transactions of KarRC of RAS]*. 2015. No. 9. P. 3–9.
- Zyryanov V. N. Under-ice seiches. *Water Resources*. 2011. Vol. 38, no. 3. P. 261–273.
- Zyryanov V. N., Lapina L. E. Slope flows governed by diffusion effects in seas, lakes, and reservoirs. *Water Resources*. 2012. Vol. 39, no. 3. P. 294–304.
- Litinskaya K. D., Polyakov Yu. K. Ozera Vendyurskoj gruppy – Uros, Rindozero, Vendyurskoe [Lakes of Vendyury group – Uros, Rindozero, and Vendyurskoe]. Vodnye resursy Karelii i ih ispolzovanie [Water resources of Karelia and their use]. Petrozavodsk: Karelskiy filial AN SSSR, 1975. P. 57–66.
- Lozovik P. A. Himicheskij sostav vzvesi, tverdoj i zhidkoj frakcii ilov i obmennye processy voda-dno [Chemical composition of slurry, solid and liquid fractions of silt and “water-bottom sediments” metabolic processes]. *Poverhnostnye vody ozerno-rechnoj sistemy Shui v usloviyah antropogennogo vozdeystviya [Surface waters of the Shuya lake-river system under anthropogenic impact]*. Petrozavodsk, 1991. P. 114–118.
- Palshin N. I. Termicheskiye i gidrodinamicheskiye protsessy v ozerakh v period ledostava [Thermal and hydrodynamic processes in lakes during the ice-covered period]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 1999. 86 p.
- Petrov M. P., Terzhevik A. Yu., Zdorovenov R. E., Zdorovenova G. E. The thermal structure of a shallow lake in early winter. *Water Resources*. 2006. Vol. 33, no. 2. P. 135–143.
- Petrov M. P., Terzhevik A. Yu., Zdorovenov R. E., Zdorovenova G. E. Motion of water in an ice-covered shallow lake. *Water Resources*. 2007. Vol. 34, no. 2. P. 113–122.
- Rossinsky K. I. Termicheskiy rezhim vodokhranilishch [Thermal regime of water reservoirs]. Moscow: IVP AN SSSR, 1975. 167 p.
- Tikhomirov A. Termika krupnykh ozer [Thermal regime of large lakes]. Leningrad: Nauka, 1982. 232 p.
- Bengtsson L., Malm J., Terzhevik A., Petrov M., Boyarinov P., Glinsky A., Palshin N. A Field Study of Thermo- and Hydrodynamics in a Small Karelian Lake during Late Winter 1994. Report 3185, Lund University, Sweden, 1995. 72 p.
- Bengtsson L., Malm J., Terzhevik A., Petrov M., Boyarinov P., Glinsky A., Palshin N. Field investigation of winter thermo- and hydrodynamics in a small Karelian lake. *Limnol. Oceanogr.* 1996. Vol. 41, no. 7. P. 1502–1513.
- Kirillin G., Leppäranta M., Terzhevik A., Granin N., Bernhardt J., Engelhardt C., Efremova T., Golosov S., Palshin N., Sherstyankin P., Zdorovenova G., Zdorovenov R. Physics of seasonally ice-covered lakes: a review. *Aquatic Sciences*. 2012. 74 (4). P. 659–682.
- Maher O. A., Malm J., Terzhevik A., Bengtsson L., Boyarinov P., Mitrokhov A., Palshin N., Petrov M. Temperature and Hydrodynamics in Lake Vendyurskoe during Winter 1996/1997 and 1997/1998. Report 3223, Lund University, Sweden, 1999. 145 p.
- Malm J. Bottom buoyancy layer in an ice-covered lake. *Water Resources Res.* 1998. Vol. 34, no. 11. P. 2981–2993.
- Malm J., Terzhevik A., Bengtsson L., Boyarinov P., Glinsky A., Palshin N., Petrov M. A Field Study of Thermo- and Hydrodynamics in Three Small Karelian Lake during Winter 1994/1995. Report 3197, Lund University, Sweden, 1996. 220 p.
- Malm J., Terzhevik A., Bengtsson L., Boyarinov P., Glinsky A., Palshin N., Petrov M. A field study on currents in a shallow ice-covered lake. *Limnol. Oceanogr.* 1998. Vol. 43, no. 7. P. 1669–1679.
- Malm J., Terzhevik A., Bengtsson L., Boyarinov P., Glinsky A., Palshin N., Petrov M. Temperature and Hydrodynamics in Lake Vendyurskoe during Winter 1995/1996. Report 3213, Lund University, Sweden, 1997a. 207 p.
- Malm J., Terzhevik A., Bengtsson L., Boyarinov P., Glinsky A., Palshin N., Petrov M. Temperature and Salt Content Regimes in Three Shallow Ice-Covered Lakes: 1. Temperature, Salt Content and Density Structure. *Nordic Hydrology*. 1997b. Vol. 28. P. 99–128.
- Malm J., Terzhevik A., Bengtsson L., Boyarinov P., Glinsky A., Palshin N., Petrov M. Temperature and Salt Content Regimes in Three Shallow Ice-Covered Lakes: 2. Heat Mass Fluxes. *Nordic Hydrology*. 1997c. Vol. 28. P. 129–152.
- Zdorovenova G. E. Spatial and temporal variations of the water-sediment thermal structure in shallow ice-covered Lake Vendyurskoe (Northwestern Russia). *Aquatic Ecology*. 2009. Vol. 43. P. 629–639. doi: 10.1007/s10452-009-9277-0

Received April 05, 2016

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Пальшин Николай Иннокентьевич

старший научный сотрудник лаборатории гидрофизики,
к. г. н.
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: npalshin@mail.ru

Ефремова Татьяна Владимировна

старший научный сотрудник лаборатории гидрофизики,
к. г. н.
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: efremova@nwpi.krc.karelia.ru

Здоровеннов Роман Эдуардович

старший научный сотрудник лаборатории гидрофизики,
к. г. н.
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: romga74@gmail.com
тел.: +79212209438

Здоровеннова Галина Эдуардовна

и. о. зав. лабораторией гидрофизики, к. г. н.
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: zdorovennova@gmail.com
тел.: +79116660369

CONTRIBUTORS:

Palshin, Nikolai

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: npalshin@mail.ru

Efremova, Tatyana

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: efremova@nwpi.krc.karelia.ru

Zdorovennov, Roman

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: romga74@gmail.com
tel.: +79212209438

Zdorovennova, Galina

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: zdorovennova@gmail.com
tel.: +79116660369

УДК 628.17 (282.247.211)

ХОЗЯЙСТВЕННОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ДИНАМИКА

А. В. Литвиненко, М. С. Богданова, И. А. Литвинова

Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН

Прибрежная зона, по сравнению с остальной территорией водосбора Онежского озера, испытывает максимальное антропогенное воздействие. Именно в этой двухкилометровой прибрежной полосе проживает более 80 % населения водосбора и сосредоточено примерно 95 % суммарного водопотребления бассейна Онежского озера. В данной статье проведен анализ современного состояния хозяйственного использования водных ресурсов в прибрежной зоне Онежского озера, а также представлена динамика водопотребления и водоотведения за период с 1980 по 2013 год.

Ключевые слова: водное хозяйство; водопотребление; водоотведение; антропогенная нагрузка.

A. V. Litvinenko, M. S. Bogdanova, I. A. Litvinova. ECONOMIC MANAGEMENT OF WATER RESOURCES IN THE NEAR – SHORE ZONE OF LAKE ONEGO: CURRENT STATE AND DYNAMICS

The two-kilometer coastal zone of Lake Onego is exposed to much more intensive anthropogenic load than the rest of the drainage basin. More than 80 % of the catchment's human population live in this coastal zone and about 95 % of catchment-total water consumption is concentrated there. The paper describes the current state of economic management of water resources in the coastal zone of Lake Onego, and the dynamics of water consumption and water disposal from 1980 until 2013.

Key words: water management; water consumption; water disposal; anthropogenic load.

Введение

Онежское озеро расположено на северо-западе Европейской территории России, является третьим по площади пресноводным водоемом нашей страны после оз. Байкал и Ладожского озера, а также вторым по площади пресноводным озером Европы. В административном отношении около 70 % территории его бассейна принадлежит Республике Карелия,

остальная часть расположена в Ленинградской, Вологодской и Архангельской областях. В 1953 г. Онежское озеро было зарегулировано и на его основе образовано Верхнесвирское водохранилище с площадью водосбора 57 300 км² и площадью зеркала 9840 км² [Государственный водный кадастр..., 1985]. В настоящее время водоем активно используется для нужд водоснабжения населенных пунктов и крупных промузлов, расположенных на его

побережье, является частью Беломорско-Балтийского водного пути, водохранилищем Верхнесвирской ГЭС, а также имеет высокое рыбохозяйственное и рекреационное значение. Водоем выполняет функцию приемника сточных вод промышленных предприятий, коммунально-бытовых и сельскохозяйственных стоков. Поступление загрязняющих веществ в водоем крайне неравномерно и связано с особенностями распределения приточности и различной степенью антропогенной нагрузки на водосборе.

Материалы и методы

При выполнении работы по оценке и анализу современного состояния и многолетней динамики хозяйственного использования прибрежной зоны и, соответственно, антропогенного влияния на Онежское озеро использовались материалы государственной статистики, обобщенные в разработанной в ИВПС КарНЦ РАН ГИС «Водные ресурсы Республики Карелия и их использование» [Богданова и др., 2009; Свидетельство... № 2011620136..., № 2011650139...; Литвиненко и др., 2012]

Также привлекались материалы Гидрометеослужбы, как опубликованные, так и дополнительно приобретенные Институтом.

Результаты и обсуждение

Общий объем водопотребления в бассейне Онежского озера в настоящее время (2013 г.) составляет 93 057,3 тыс. м³. Большая часть (48,7 %) воды используется промышленностью. Основная доля промышленного водопотребления (91 %) приходится на ЦБП, и оно практически целиком сосредоточено в крупных промышленных центрах.

Объем промышленного водопотребления, остававшийся примерно постоянным в течение 1980-х годов, в 1990-х претерпел резкий спад и с 2001 по 2009 г. сохранял относительную стабильность (на уровне примерно 60 % от исходного максимального значения), после чего снова пошел на спад.

Вторым по объему (32,8 %) является коммунально-бытовое водопотребление. По сравнению с 1980 г. оно увеличилось в 1,6 раза и оставалось примерно постоянным до 2009 г., после чего также пошло на спад. Основные его объемы сосредоточены в наиболее крупных населенных пунктах бассейна.

Объем сельскохозяйственного водопотребления в бассейне крайне незначителен.

Рыбохозяйственное водопотребление, практически прекратившееся после 1991 г., начало интенсивно восстанавливаться. Его доля к 2013 г. достигла 18,2 %.

Водозабор в бассейне осуществляется преимущественно из озер. Для коммунально-бытового водоснабжения основным источником является Онежское озеро.

Одним из основных факторов, определяющих современное состояние, тенденции развития и экологические проблемы Онежского озера, является поступление в него отходов жизнедеятельности человека, в частности сточных вод. Они могут поступать как непосредственно в водоем, так и в водные объекты на водосборе и затем выноситься в водоприемник речным стоком. Уровень влияния на экосистему озера зависит не только от объемов сбросов и их качественного состава, но и от расстояния до точки сброса (времени добега воды). Данное обстоятельство дает основание для районирования территории водосбора по степени экологической опасности для водного объекта. Однако возникает вопрос о критериях такого районирования.

Согласно принятым нормам, при проектировании зон санитарной охраны (ЗСО) поверхностных источников водоснабжения границы 2-го пояса ЗСО вверх по течению реки устанавливаются исходя из скорости течения воды, усредненной по ширине и длине водотока, и времени протекания воды от границы пояса до водозабора при среднемесечном расходе воды летне-осенней межени 95%-й обеспеченности не менее 3 суток (для данного климатического района). Предполагается, что этого времени достаточно для нейтрализации основных загрязняющих веществ за счет самоочищающей способности водных объектов. Если принять значение усредненной скорости равным 10–12 см/с, то длина 3-суточного пробега будет составлять 25–30 км (для безозерных участков) [Литвиненко и др., 1999].

Безусловно, этот критерий является в достаточной степени условным, но на данном этапе исследований он может быть использован. В таком случае мы допускаем, что сточные воды, сбрасываемые за пределами 30-километровой зоны, на экосистему Онежского озера оказывают минимальное влияние.

Но и внутри этой зоны можно выделить территорию, имеющую особое значение для водоема. Это полоса побережья, ширину которой, также в некоторой степени условно, можно принять равной двухкилометровой водоохранной зоне (рис. 1). С этой территории сточные воды поступают в Онежское озеро практически

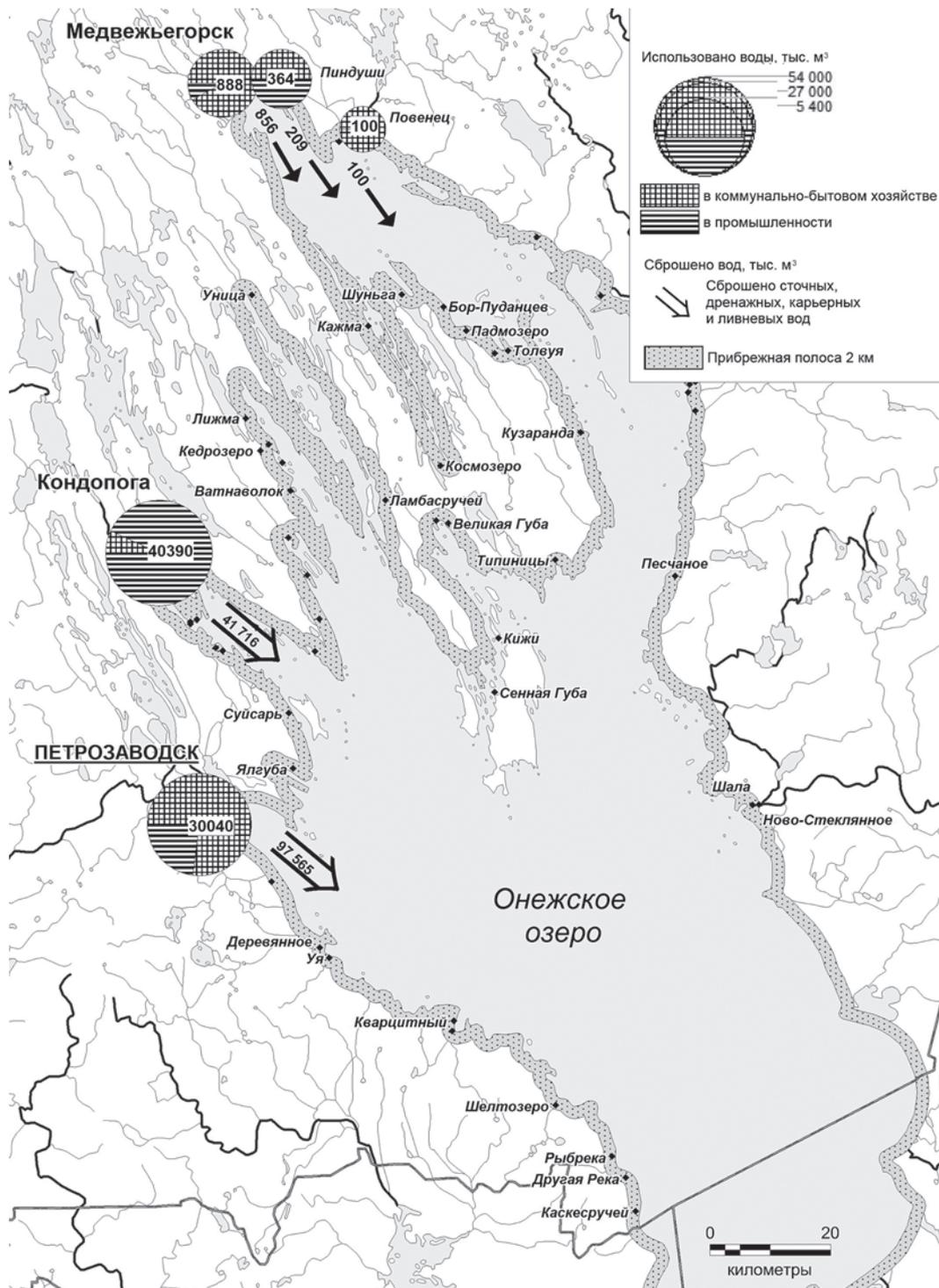


Рис. 1. Хозяйственное использование прибрежной зоны Онежского озера

без какой-либо трансформации. Кроме того, здесь сосредоточено основное население бассейна (более 80 % от общего числа жителей) и большая часть водопотребителей (95 % суммарного водопотребления).

Вследствие этого динамика водопотребления и водоотведения именно в этой полосе обуславливает главным образом экологические проблемы водоема.

На рисунке 2 представлена динамика водопотребления в прибрежной зоне Онежского озера с 1980 г. по настоящее время (собственные хозяйственно-питьевые нужды промышленности включены в промышленное водопотребление).

Общий объем сбросов по бассейну в 2013 г. составил 165,6 млн м³. Основную часть сбросов составляют сточные воды – 89,5 млн м³.

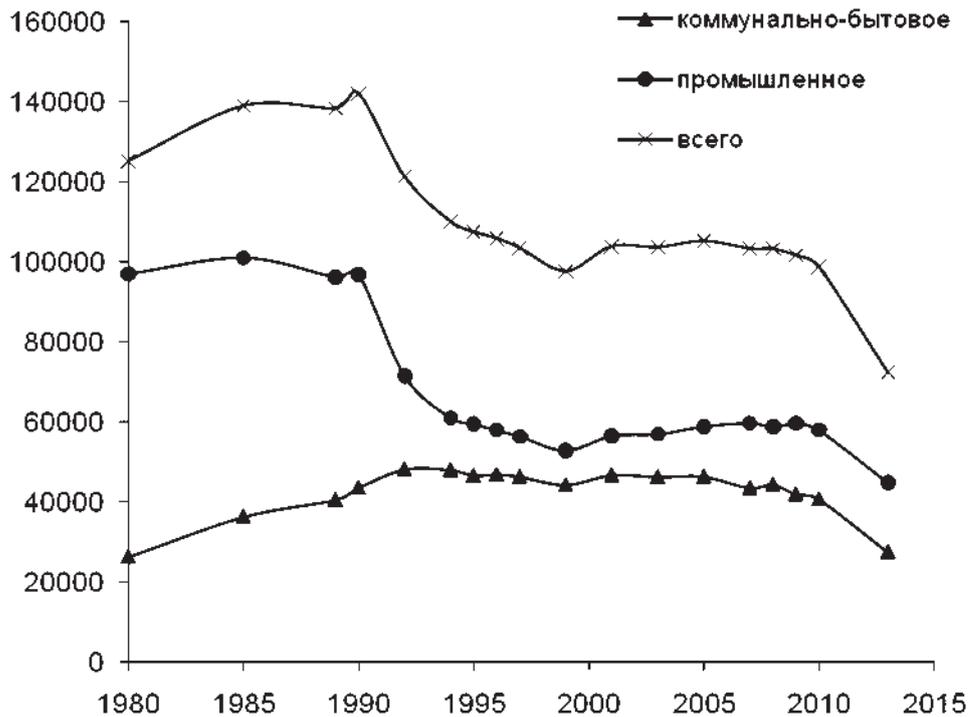


Рис. 2. Динамика водопотребления в прибрежной зоне Онежского озера, тыс. м³

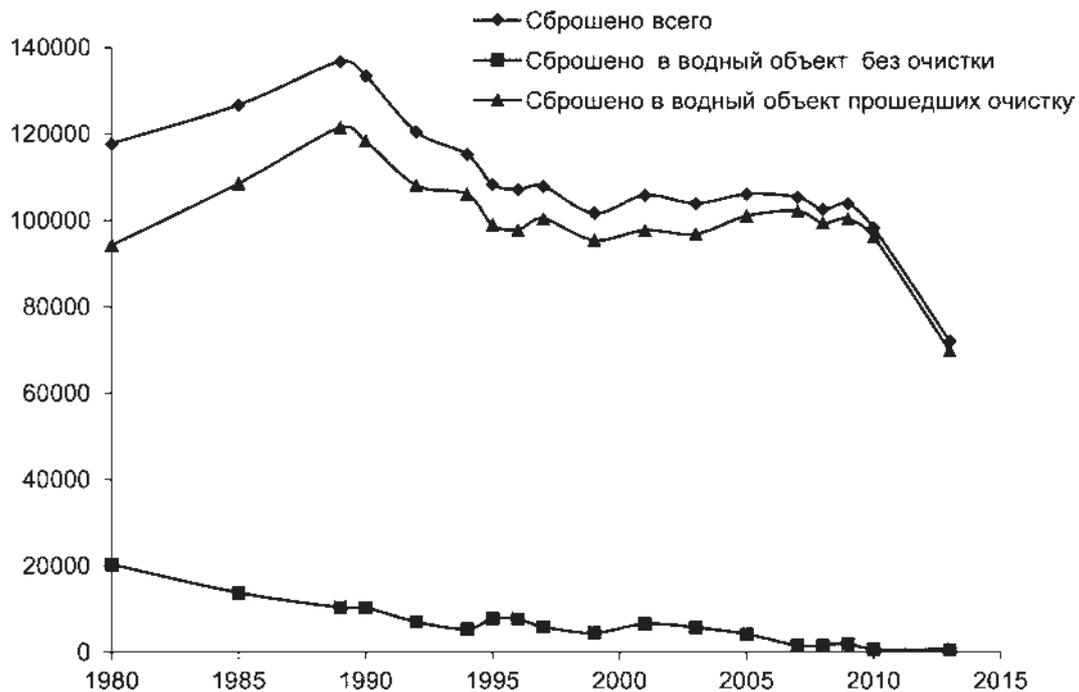


Рис. 3. Сброс сточных, дренажных и карьерных вод в прибрежной зоне Онежского озера, тыс. м³

Доля каждого вида сточных вод примерно пропорциональна соответствующему объему водопотребления. Кроме сточных организованно сбрасываются дренажные (2,6 млн м³), карьерные (4,2 млн м³), а также ливневые воды (70,1 млн м³).

После 1989 г. в течение нескольких лет происходило снижение сбросов сточных

вод, обусловленное сокращением в первую очередь промышленного производства. В дальнейшем их объем оставался примерно постоянным до 2009 г. (рис. 3). Затем объем водоотведения снова начал снижаться пропорционально водопотреблению. Основная причина – сокращение производства на Кондопожском ЦБК и уменьшение

Очистка сточных вод по промышленным центрам, тыс. м³ (2013 г.)

| Промцентры | Сброшено сточных, дренажных, карьерных и ливневых вод, тыс. м ³ | | | | | |
|----------------------------------|--|------------------|-------------------|-------------------------------|----------------------|---|
| | всего | в водные объекты | | | в выгреб и на рельеф | в т. ч. дренажных, карьерных и ливневых вод |
| | | без очистки | прошедших очистку | нормативно чистых без очистки | | |
| Петрозаводск | 97 565 | 69 006 | 28 271 | 0 | 288 | 69 273 |
| Кондопога | 41 716 | 0 | 41 325 | 364 | 27 | 2066 |
| Медвежьегорск | 856 | 565 | 0 | 0 | 291 | 1 |
| Пиндуши | 209 | 0 | 182 | 0 | 27 | 0 |
| Повенец | 100 | 0 | 71 | 0 | 29 | 0 |
| Всего в прибрежной зоне | 141 314 | 69 648 | 69 881 | 364 | 1422 | 71 781 |
| Суоярви | 4539 | 0 | 487 | 0 | 4052 | 3877 |
| Всего в бассейне Онежского озера | 165 590 | 70 252 | 72 180 | 17 309 | 2882 | 76 962 |

коммунально-бытового водопотребления г. Петрозаводска.

В настоящее время во всем бассейне Онежского озера самостоятельный сброс стоков осуществляет 121 водопользователь. Большая часть (45,7 %) сбрасываемых ими сточных вод проходит очистку, но в недостаточной степени; 10,4 % стоков считаются нормативно чистыми и сбрасываются без очистки; 43,9 % очистке не подвергаются и сбрасываются загрязненными.

Основную долю объема сточных вод в прибрежной зоне дают промышленные центры – Петрозаводск и Кондопога (табл.; рис. 1), что обуславливает приуроченность экологических проблем к районам озера, непосредственно примыкающим к ним и являющимся приемниками стоков (Петрозаводская и Кондопожская губы). В связи с этим необходима модернизация очистных сооружений, и в первую очередь – указанных промцентров.

Сбросы сточных вод, как правило, приурочены к населенным пунктам, и их распределение по территории и особенности определяются сложившейся системой расселения и ее спецификой. В рассматриваемой зоне в пределах Республики Карелия в настоящее время располагается около 60 населенных пунктов четырех административных районов (Прионежского, Кондопожского, Медвежьегорского и Пудожского) и Петрозаводского горсовета. К ним и приурочены основные районы риска для водных экосистем.

Заключение

Для сохранения и улучшения качества водных ресурсов Онежского озера необходимо выполнять все установленные водоохранные меры, и в первую очередь сократить сбросы

загрязненных вод в водные объекты, для чего построить очистные сооружения, в частности, в городах Медвежьегорске, Пудоже, Суоярви. Имеющиеся очистные сооружения необходимо усовершенствовать и довести очистку сточных вод до состояния нормативно очищенных. В перспективе промышленные предприятия, расположенные в бассейне Онежского озера, должны перейти на малоотходную технологию или на замкнутый цикл водообеспечения, что существенно сократит поступление загрязнений в водные объекты.

Работа выполнена при финансовой поддержке проектов РФФИ 14–05–00663 (оценка хозяйственного использования водных ресурсов) и РНФ № 14–17–00766 (разработка рекомендаций по водоохранным мероприятиям в прибрежной зоне Онежского озера).

Литература

Богданова М. С., Литвиненко А. В., Литвинова И. А. Применение геоинформационных технологий в водохозяйственных исследованиях // Устойчивое развитие и геоэкологические проблемы Балтийского региона: материалы межд. науч.-практ. конф., посв. 1150-летию Великого Новгорода / Редколлегия: Д. А. Субетто, В. Л. Верин, Н. Г. Дмитрук. Новгород, 2009. С. 25–31.

Государственный водный кадастр. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Ч 1, 2. Т. 1. РСФСР. Вып. 5. Бассейны рек Балтийского моря, Онежского и Ладожского озера. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 688 с.

Литвиненко А. В., Богданова М. С., Карпечко В. А., Литвинова И. А. Оценка состояния водных ресурсов бассейна Онежского озера с использованием ГИС-технологий // Известия Русского географического общества. 2012. Т. 144, № 2. С. 69–80.

Литвиненко А. В., Литвинова И. А., Осипова Л. В. Водохозяйственные проблемы прибрежной зоны озера // Онежское озеро. Экологические проблемы / Отв. ред. Н. Н. Филатов. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 1999. С. 49–57

Свидетельство об официальной регистрации базы данных № 2011620136 от 16.02.2011 г. «Водохо-

зяйственный комплекс Республики Карелия». Авторы Литвиненко А. В., Богданова М. С., Филатов Н. Н.

Свидетельство об официальной регистрации базы данных № 2011650139 от 16.02.2011 г. «Водные объекты Республики Карелия». Авторы Литвиненко А. В., Филатов Н. Н., Богданова М. С.

Поступила в редакцию 19.02.2016

References

Bogdanova M. S., Litvinenko A. V., Litvinova I. A. Primenenie geoinformacionnyh tehnologij v vodohozjajstvennyh issledovanijah [Application of GIS technologies in water management studies]. Ustojchivoe razvitie i geojekologicheskie problemy Baltijskogo regiona [Sustainable development and geoecological problems of the Baltic region]. Proceedings of the International scientific-practical conference, dedicated to the 1150th anniversary of Veliky Novgorod. Editorial Board: D. A. Subetto, V. L. Verin, N. G. Dmitruk. Novgorod, 2009. P. 25–31.

Gosudarstvennyj vodnyj kadastr. Mnogoletnie dannye o rezhime i resursah poverhnostnyh vod sushi [The state water cadastre. Long-term data on surface waters condition and resources]. Pt 1, 2. Vol. 1 R. S. F. S. R. Iss. 5. Bassejny rek Baltijskogo morja, Onezhskogo i Ladozhskogo ozer [Basins of the Baltic Sea, Onega and Ladoga Lakes]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1986. 688 p.

Litvinenko A. V., Bogdanova M. S., Karpechko V. A., Litvinova I. A. Ocenka sostojanija vodnyh resursov bassejna Onezhskogo ozera s ispolzovaniem GIS-tehnologij [Estimation of Lake Onega water resources condition using GIS technologies]. *Izvestija Russkogo*

geograficheskogo obshhestva [Proceedings of the Russian geographical society]. 2012. Vol. 144, no. 2. P. 69–80.

Litvinenko A. V., Litvinova I. A., Osipova L. V. Vodohozjajstvennye problemy pribrezhnoj zony ozera [Problems of water management in the coastal zone of a lake]. Onezhskoe ozero. Jekologicheskie problemy [Lake Onega. Ecological problems]. Ed. N. N. Filatov. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 1999. P. 49–57.

Svidetelstvo ob oficialnoj registracii bazy dannyh № 2011620136 ot 16.02.2011 g. "Vodohozjajstvennyj kompleks Respubliki Karelija" [The certificate of official registration of the database "Water management complex of the Republic of Karelia" N 2011620136 from 16.02.2011]. Authors: Litvinenko A. V., Bogdanova M. S., Filatov N. N.

Svidetelstvo ob oficialnoj registracii bazy dannyh № 2011650139 ot 16.02.2011 g. "Vodnye objekty Respubliki Karelija" [The certificate of official registration of the database "Water objects of the Republic of Karelia" N 2011650139 from 16.02.2011]. Authors: Litvinenko A. V., Filatov N. N., Bogdanova M. S.

Received February 19, 2016

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Литвиненко Александр Васильевич

старший научный сотрудник
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: litvinenko@nwpi.krc.karelia.ru
тел.: +79212239383

Богданова Мария Сергеевна

младший научный сотрудник
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: mari-mb@mail.ru
тел.: +79214630148

Литвинова Ирина Абрамовна

инженер-исследователь
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: litvinovoi@rambler.ru
тел.: +79535284996

CONTRIBUTORS:

Litvinenko, Alexandr

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: litvinenko@nwpi.krc.karelia.ru
tel.: +79212239383

Bogdanova, Maria

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: mari-mb@mail.ru
tel.: +79214630148

Litvinova, Irina

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: litvinovoi@rambler.ru
tel.: +79535284996

ГИДРОХИМИЯ И ДОННЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ

УДК 556.114.6:546 (282.247.211)

ОСОБЕННОСТИ СОДЕРЖАНИЯ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ФОРМ ФОСФОРА В ВОДОЕМАХ ГУМИДНОЙ ЗОНЫ

А. В. Рыжаков, М. В. Зобкова, П. А. Лозовик

Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН

На примере разнотипных водных объектов Карелии установлены закономерности содержания и распределения в них основных форм фосфора – минерального, органического, взвешенного и связанного с железом в комплексах с гумусовыми веществами. Выявлена сезонная изменчивость содержания форм фосфора в водных объектах Карелии различного трофического статуса.

Ключевые слова: водоемы гумидной зоны; биогенный элемент фосфор; автохтонное и аллохтонное органическое вещество; ДЭАЭ-целлюлоза.

A. V. Ryzhakov, M. V. Zobkova, P. A. Lozovik. PATTERNS IN THE CONCENTRATION AND DISTRIBUTION OF PHOSPHORUS FORMS IN WATER BODIES OF THE HUMID ZONE

Regularities in the concentration and distribution of basic forms of phosphorus such as mineral, organic, suspended and bound to iron in complexes with humic substances were determined for diverse Karelian water bodies. Seasonal variations of the concentrations of phosphorus forms in Karelian water bodies of different trophic status were found.

Key words: humid zone waters; phosphorus as nutrient; autochthonous and allochthonous organic matter; DEAE-cellulose.

Введение

Фосфор является важнейшим биогенным элементом. Главными источниками его поступления в водоемы служат фосфорсодержащие породы и атмосферные осадки. Кроме того, различные виды антропогенного влияния вызывают значительное повышение содержания

общего фосфора ($P_{\text{общ}}$), что способствует процессу эвтрофирования природных вод [Алекин, 1970]. Минеральный ($P_{\text{мин}}$), или «реакционноспособный», фосфор, представленный главным образом фосфатами ($H_2PO_4^-$, HPO_4^{2-}), активно потребляется водными организмами для своего роста и развития в процессе фотосинтеза. Органическую форму ($P_{\text{орг}}$) можно

рассматривать как «резервную». В случае возникновения дефицита этого биогенного элемента включаются биохимические механизмы превращения органического фосфора в минеральный под действием специфических ферментов – щелочной и кислотной фосфатаз. При деструкции органического вещества (ОВ) минеральный фосфор вновь возвращается в водную среду. Ранее нами были установлены количественные закономерности этих превращений, обуславливающих в целом круговорот фосфора в водоемах гумидной зоны [Ryzhakov, Sabylina, 2015].

Ввиду многообразия соединений фосфора в природной воде ($H_2PO_4^-$, HPO_4^{2-} , полифосфаты, органический, связанный с Al и Fe и др.), которые находятся как во взвешенной, так и в растворенной форме, не представляется возможным точно установить содержание каждой из них, в частности, выделить органическую, в которую в той или иной степени попадут связанные с железом неорганические фосфаты. Очень часто в гидрохимической практике используется расчетный метод определения $P_{орг} = P_{общ} - P_{мин}$, но в данную форму попадут и неорганические соединения фосфора, которые не прореагировали с реактивом Дениже – Аткинса. Поэтому указанный способ расчета $P_{орг}$ не дает однозначного результата и носит условный характер. Под органическим фосфором следует понимать фосфор, входящий в состав органических соединений и связанный с железом, находящимся в виде комплексов с гумусовыми веществами и не усваиваемым фитопланктоном. Взвешенный фосфор указывает, какая доля всех форм фосфора находится во взвешенном состоянии. Ее можно рассчитать по разности содержания общего фосфора до и после центрифугирования проб воды: $P_{общ} - P_{раств} = P_{взв}$, а $P_{раств}$ учитывает количество всех форм фосфора, находящихся в растворенном состоянии. Кроме того, значительная часть фосфора (как минерального, так и органического) может быть связана с соединениями железа и находится в составе гумусовых веществ [Linnik et al., 2013], что особенно важно для водоемов гумидной зоны. Такие водные объекты (озера и реки) характеризуются высокими значениями перманганатной окисляемости (ПО) и других косвенных показателей содержания ОВ. Эту форму фосфора можно установить по разности $P_{общ}$ до и после адсорбции гумусовых кислот на ДЭАЭ-целлюлозе.

Следовательно, аналитически или расчетным путем можно установить следующие основные формы фосфора в поверхностных водах гумидной зоны:

1) общий фосфор ($P_{общ}$), характеризующий валовое содержание всех форм фосфора в воде (растворенного, взвешенного, минерального, органического и Fe-связанного с гумусовыми веществами);

2) минеральный, или «реакционноспособный» фосфор ($P_{мин}$), включающий все фосфаты, которые реагируют с реактивом Дениже – Аткинса. Это наиболее важная с точки зрения биопродуктивности водоема форма фосфора;

3) растворенный фосфор ($P_{раств}$) определяется после удаления взвешенных веществ центрифугированием. Кроме минерального фосфора он содержит органические соединения фосфора, растворенные в воде;

4) взвешенный фосфор ($P_{взв}$) вычисляется по разности $P_{общ}$ и $P_{раств}$. Он включает как минеральные, так и органические соединения фосфора, нерастворимые в воде;

5) железосвязанный с гумусовыми веществами ($P_{Fe-связ}$) фосфор рассчитывается по разности $P_{общ}$ до и после удаления взвешенных частиц и гумусовых веществ адсорбцией на ДЭАЭ-целлюлозе за вычетом $P_{взв}$;

6) органический фосфор ($P_{орг}$) включает как растворенный в составе автохтонного ОВ, так и нерастворенный в составе взвешенных и гумусовых веществ аллохтонного происхождения. Его определение в аналитическом виде является наиболее сложной задачей, поэтому используют расчетный метод – по разнице между общим и минеральным фосфором в исходной воде.

Таким образом, при данном методическом подходе некоторые формы фосфора (например, $P_{орг}$ или $P_{взв}$) могут попадать в различные из перечисленных групп, что зачастую усложняет составление их общего баланса.

Целью данной работы является установление закономерностей содержания и распределения фосфора в водоемах гумидной зоны на примере разнотипных водных объектов Карелии. Предполагалось выявить зависимость распределения важнейших форм этого биогенного элемента от трофического статуса водных объектов и сезонов года.

Объекты и методы исследования

Исследование было проведено на разнотипных водных объектах Республики Карелия: в летний период 2011 г. – на 28 и в течение четырех гидрологических сезонов 2012–2013 гг. – на 17 водоемах (рис. 1). Все выбранные водные объекты отличаются по гидрологическим и химическим показателям, а также по уровню трофии.

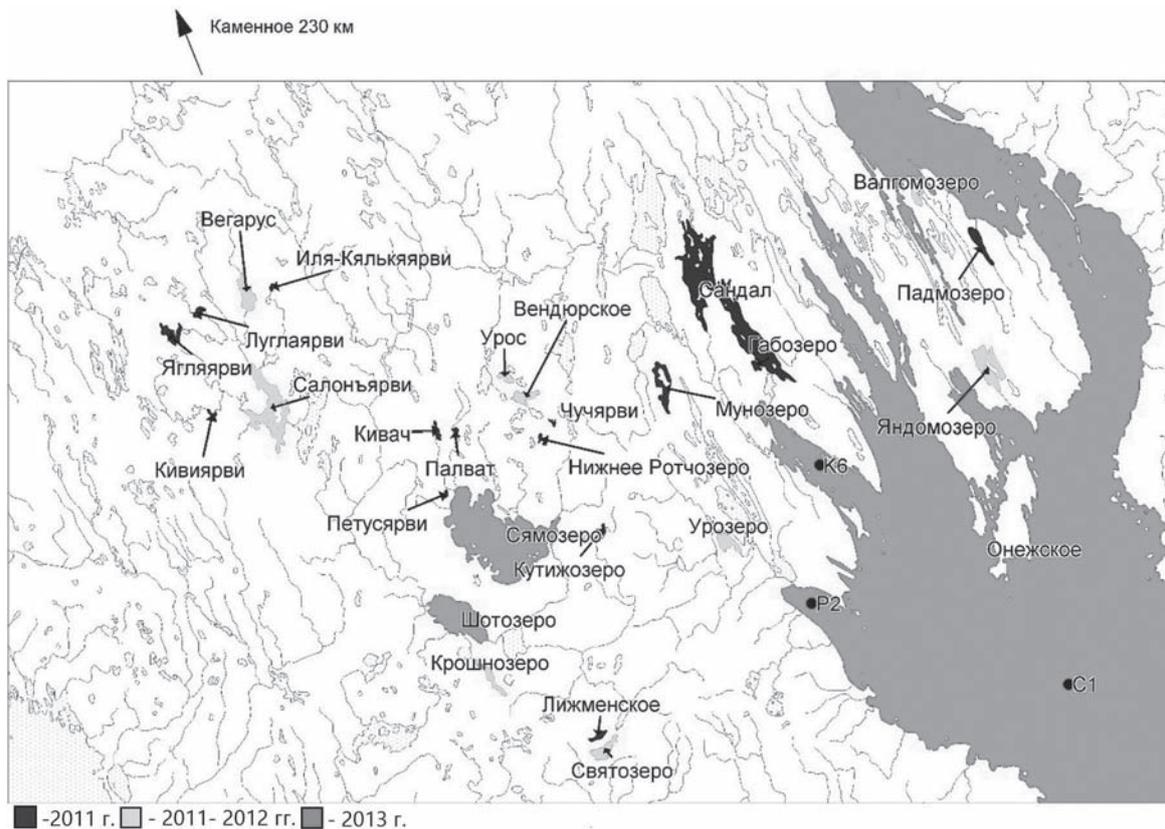


Рис. 1. Схема расположения исследованных водных объектов

| | ультраолиготрофные | олиготрофные | мезотрофные | эвтрофные | высокоэвтрофные |
|---|--------------------|--------------|---------------|-----------|-----------------|
| Низкогумусные $P_{\text{общ}}$, мкг/л | 2 | 4 | 10 | 25 | 60 |
| Мезогумусные $P_{\text{общ}}$, мкг/л | 2 | 5 | 12 | 30 | 75 |
| Мезополигумусные $P_{\text{общ}}$, мкг/л | 2 | 6 | 15 | 40 | 95 |
| Полигумусные $P_{\text{общ}}$, мкг/л | 3 | 8 | 20 | 50 | 125 |
| | низкотрофные | | среднетрофные | | высокотрофные |

Рис. 2. Классификация вод гумидной зоны по трофности [Лозовик, 2013]

Количественный химический анализ железа, перманганатной окисляемости и $P_{\text{общ}}$ и $P_{\text{мин}}$ проводился по аттестованным методикам [Руководство..., 2009]. Для удаления взвешенных веществ из воды использовалось центрифугирование проб, которое проводили в течение 15 мин при 4000 об./мин. Адсорбция гумусовых веществ из воды осуществлялась при помощи диэтиламиноэтилцеллюлозы (ДЭАЭ-целлюлоза) по разработанной методике [Лозовик, Мусатова, 2013].

Общий фосфор определяли в исходной воде, в центрифугированных пробах (для

оценки доли взвешенного фосфора) и в пробах, обработанных ДЭАЭ-целлюлозой. В последнем случае адсорбент поглощал гуминовые и фульвовые кислоты в комплексе с железом, а также и тот фосфор, который был связан с этими соединениями и находящийся во взвеси. В тех же самых пробах был определен и минеральный фосфор.

Результаты и обсуждение

Для разделения исследуемых водоемов по трофности применялась недавно

разработанная классификация [Лозовик, 2013], которая учитывает $P_{\text{общ}}$ – основной лимитирующий биогенный элемент в поверхностных водах гумидной зоны. В целом шкала трофности разделяется на три области: высокотрофных (эвтрофных и высокоэвтрофных), низкотрофных (ультраолиготрофных и олиготрофных) и промежуточную между ними – среднетрофных

(мезотрофных) водоемов. Выше верхней границы высокоэвтрофных располагаются гипертрофные водные объекты, но на территории Карелии они не встречаются (рис. 2).

Содержание $P_{\text{общ}}$, $P_{\text{взв}}$ и $P_{\text{мин}}$ в природных водах Карелии изменяется в очень широких пределах (табл. 1). Так, концентрация $P_{\text{общ}}$ варьирует от 2 до 200 мкг/л, причем верхний предел не связан с антропогенным влиянием, а соответствует особенностям природных объектов. В целом распределение $P_{\text{общ}}$ выглядит таким образом, что в большинстве объектов (75 %) его содержание <26 мкг/л, у половины объектов оно находится в пределах 10–26 мкг/л, у четверти – <10 мкг/л [Лозовик, 2006].

Содержание $P_{\text{общ}}$, $P_{\text{мин}}$, $P_{\text{взв}}$, $P_{\text{Fe-связ}}$ и $P_{\text{орг}}$ в исследуемых водоемах летом 2011 г. представлено в таблице 2. Как видно из полученных данных, водные объекты значительно отличаются друг от друга как по общему содержанию, так и по распределению отдельных форм фосфора. Содержание общего фосфора в водоемах

Таблица 1. Формы фосфора в поверхностных водах Карелии, мкг/л

| Статистические показатели | $P_{\text{общ}}$ | $P_{\text{взв}}$ | $P_{\text{мин}}$ |
|---------------------------|------------------|------------------|------------------|
| Мин. | 2 | 0 | 0 |
| Макс. | 204 | 63 | 109 |
| Ср. арифм. | 24 | 9 | 5 |
| Ср. геом. | 18 | 6 | 3 |
| Медиана | 17 | 5 | 2 |
| 1-й квартиль | 10 | 4 | 0 |
| 3-й квартиль | 27 | 9 | 4 |
| Станд. откл. | 25 | 9 | 13 |
| n | 799 | 171 | 744 |

Таблица 2. Содержание различных форм фосфора в исследуемых водоемах летом 2011 г.

| Водный объект | Формы фосфора, мкг/л | | | | | | | |
|---------------------------|----------------------|------------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|----------------------|
| | До адсорбции | | | После адсорбции | | Расчетные | | |
| | $P_{\text{общ}}$ | $P_{\text{мин}}$ | $P_{\text{раст}}$ | $P_{\text{общ}}$ | $P_{\text{мин}}$ | $P_{\text{орг}}$ | $P_{\text{взв}}$ | $P_{\text{Fe-связ}}$ |
| оз. Иля-Калькянъярви | 21 | 6 | 15 | 9 | 2 | 15 | 6 | 6 |
| оз. Вегарусъярви | 17 | 5 | - | - | 2 | 12 | - | - |
| оз. Салонъярви | 24 | 6 | 23 | 12 | 1 | 18 | 1 | 11 |
| оз. Яглярви | 29 | 6 | 17 | 18 | 3 | 23 | 12 | 11 |
| р. Кутизма | 112 | 49 | 71 | - | 9 | 63 | 41 | - |
| оз. Кивиярви | 20 | 6 | 13 | 11 | 2 | 14 | 7 | 2 |
| оз. Лугляярви | 28 | 6 | 21 | 7 | 4 | 22 | 7 | 14 |
| оз. Яндомозеро | 52 | 4 | 24 | - | 5 | 48 | 28 | - |
| оз. Валгомозеро | 40 | 8 | 12 | - | 6 | 32 | 28 | - |
| оз. Падмозеро | 31 | 9 | 9 | 14 | 5 | 22 | 12 | 5 |
| оз. Петусъярви | 36 | 11 | 13 | - | 10 | 25 | 23 | - |
| оз. Чучъярви | 10 | 2 | 5 | - | 0,5 | 8 | 5 | - |
| оз. Вендюрское | 27 | 2 | 22 | 16 | 1 | 25 | 5 | 6 |
| оз. Урос | 9 | 1 | 5 | - | 0,5 | 9 | 4 | - |
| оз. Ротчезеро | 51 | 9 | 29 | 26 | 3 | 42 | 22 | 3 |
| оз. Палват | 97 | 7 | 59 | 49 | 3 | 90 | 38 | 10 |
| оз. Кивач | 39 | 4 | 20 | 16 | 2 | 35 | 19 | 4 |
| оз. Мунозеро | 16 | 1 | 6 | - | 0,5 | 15 | 10 | - |
| оз. Урозеро | 9 | 1 | 2 | 1 | 0,5 | 8 | 7 | 1 |
| оз. Крошнозеро | 192 | 10 | 17 | - | 5 | 182 | 175 | - |
| оз. Лижемское | 12 | 1 | 10 | 8 | 0,5 | 11 | 2 | 2 |
| оз. Святозеро | 104 | 5 | 16 | 14 | 0,5 | 99 | 88 | 2 |
| оз. Сандал | 9 | 1 | 6 | 2 | - | 8 | 3 | 4 |
| оз. Габозеро | 26 | 2 | 7 | 7 | 1 | 24 | 19 | 0 |
| оз. Онежское (С1 поверх.) | 11 | 1 | 6 | 1 | 0,5 | 10 | 5 | 5 |
| оз. Онежское (С1 придон.) | 7 | 1 | 6 | 7 | 0,5 | 7 | 1 | 0 |
| оз. Выгозеро (придон.) | 14 | 2 | 11 | 3 | 0,5 | 12 | 3 | 8 |

Примечание. Здесь и далее: прочерк – отсутствие данных.

варьирует от 7 до 192 мкг/л, в то время как растворенного – только от 5 до 59 мкг/л. Как видно, центрифугирование проб приводит в большинстве случаев к довольно значительному снижению содержания $P_{\text{общ}}$. Так, концентрация $P_{\text{общ}}$ в оз. Крошнозеро составила 192 мкг/л, а $P_{\text{раст}}$ – только 17 мкг/л, остальное пришлось на взвешенную форму, что связано с активной вегетацией фитопланктона в период цветения воды в этом водоеме в 2011 г. В целом установлено, что доля $P_{\text{взв}}$ в исследуемых водных объектах меняется в широком диапазоне (от 5 до 91 %), составляя в среднем около 45 %. Данные по значению ПО показывают, что в большинстве проб происходит некоторое снижение этого показателя после удаления взвешенных веществ (табл. 3). Наибольшие изменения показателя ПО в воде после центрифугирования отмечены для эвтрофных озер Крошнозеро, Святозеро, а также р. Кутизма.

Содержание минерального фосфора изменяется в более узком диапазоне, чем вообще, – от 1 до 49 мкг/л и в среднем составляет

6 мкг/л. Такое низкое содержание $P_{\text{мин}}$ во всех водных объектах, кроме р. Кутизма, объясняется протеканием продукционных процессов, в результате которых происходит активное потребление $P_{\text{мин}}$. Концентрация $P_{\text{мин}}$ также снижается после центрифугирования проб, хоть и в гораздо меньшей степени, чем для $P_{\text{общ}}$.

Адсорбция проб воды на ДЭАЭ-целлюлозе во всех случаях также приводит к значительному снижению содержания $P_{\text{мин}}$ и $P_{\text{общ}}$ (табл. 2), которое количественно характеризует доли взвешенного и железосвязанного фосфора в пробах воды. Данные таблицы 3 свидетельствуют, что после адсорбции резко снижается показатель ПО. Это объясняется поглощением гуминовых веществ адсорбентом. Что касается железа, то адсорбция его вместе с гумусовыми веществами ДЭАЭ-целлюлозой приводит к снижению концентрации этого элемента в несколько раз, вплоть до аналитического нуля (табл. 3). Данный факт можно объяснить тем, что большая часть Fe находится в составе комплексных соединений с фульвовыми

Таблица 3. Концентрации $Fe_{\text{общ}}$ и величины ПО в исходной, центрифугированной воде и после адсорбции гуминовых веществ в выбранных водоемах летом 2011 г.

| Водный объект | $Fe_{\text{общ}}$, мг/л | | % адсорб. $Fe_{\text{общ}}$ | ПО, мгО/л | | |
|---------------------------------------|--------------------------|-----------------|--------------------------------|-----------|--------|-----------------|
| | исходная | после адсорбции | | исходная | центр. | после адсорбции |
| оз. Иля-Калькянъярви | 0,82 | 0,06 | 93 | 21,6 | 21,6 | 2,0 |
| оз. Вегарусъярви | 0,54 | 0,25 | 54 | 16,3 | 15,3 | 1,9 |
| оз. Салонъярви | 0,78 | 0,15 | 81 | 19,5 | 13,9 | 1,8 |
| оз. Яглярви | 0,80 | 0,28 | 65 | 14,3 | 14,3 | 2,6 |
| р. Кутизма | 7,25 | 1,55 | 79 | 41,8 | 35,8 | 2,8 |
| оз. Петусъярви | 1,48 | 0,47 | 68 | 19,2 | 19,2 | 2,0 |
| оз. Лугларви | 0,82 | 0,22 | 73 | 16,1 | 15,9 | 1,8 |
| оз. Валгомозеро | 0,04 | <0,01 | ~100 | 5,7 | 4,1 | 2,9 |
| оз. Падмозеро | 0,13 | <0,01 | ~100 | 10,6 | 10,6 | 3,6 |
| оз. Чучъярви | 0,06 | <0,01 | ~100 | 4,3 | 4,3 | 1,3 |
| оз. Вендюорское | 0,25 | 0,08 | 68 | 6,7 | 6,7 | 1,5 |
| оз. Урос | 0,09 | 0,03 | 67 | 3,9 | 3,9 | 1,5 |
| оз. Нижн. Ротчезеро | 0,94 | 0,42 | 55 | 15,9 | 15,9 | 3,6 |
| оз. Палват | 1,75 | 0,82 | 53 | 22,7 | 22,7 | 3,3 |
| оз. Кивач | 0,90 | 0,34 | 62 | 21,5 | 21,5 | 3,4 |
| оз. Мунозеро | 0,025 | <0,01 | ~100 | 3,9 | 3,9 | 1,2 |
| оз. Урозеро | 0,04 | <0,01 | ~100 | 3,9 | 2,7 | 1,9 |
| оз. Крошнозеро | 0,60 | 0,14 | 77 | 16,8 | 12,4 | 4,3 |
| оз. Лижемское | 0,09 | 0,03 | 67 | 5,2 | 4,6 | 1,4 |
| оз. Святозеро | 0,11 | 0,05 | 55 | 6,8 | 5,8 | 2,3 |
| оз. Санда | 0,27 | 0,13 | 52 | 11,4 | 11,4 | 4,7 |
| оз. Габозеро | 0,27 | 0,08 | 70 | 11,4 | 11,4 | 2,2 |
| оз. Онежское (С ₁ поверх.) | 0,06 | <0,01 | ~100 | - | - | - |
| оз. Онежское (С ₁ придон.) | 0,07 | <0,01 | ~100 | - | - | - |
| оз. Выгозеро (поверх.) | 0,38 | 0,06 | 84 | - | - | - |
| оз. Выгозеро (придон.) | 0,41 | 0,06 | 85 | - | - | - |

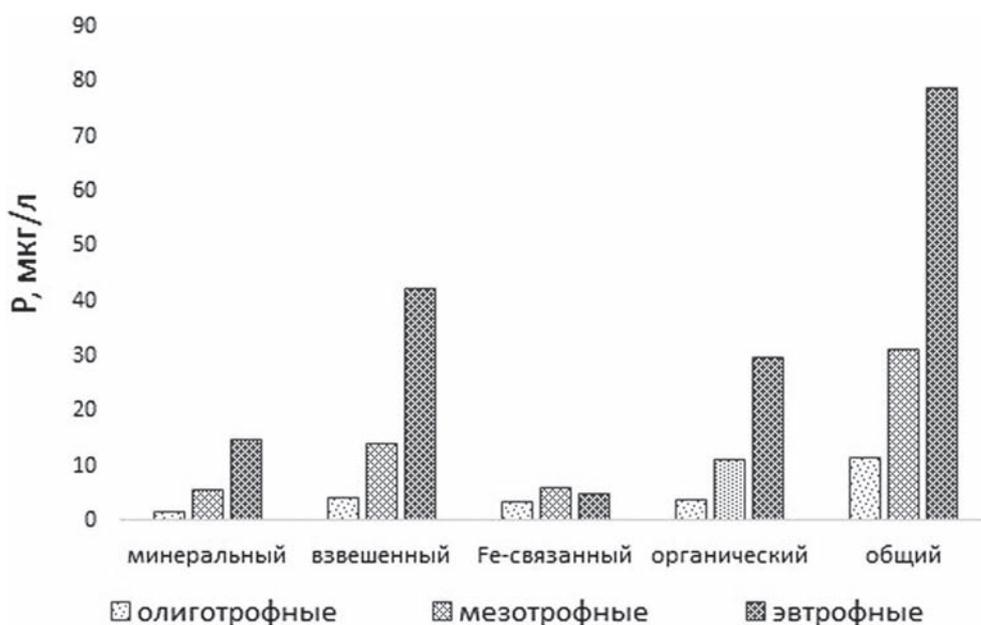


Рис. 3. Распределение важнейших форм фосфора в озерах Карелии с различным уровнем трофии

и гуминовыми кислотами, что подтверждается литературными данными. Как и большинство катионов других металлов, железо образует более прочные комплексы с фульвовыми кислотами, чем с гуминовыми [Линник, Набиванец, 1986]. Таким образом, обработка проб ДЭАЭ-целлюлозой приводит к одновременной адсорбции нескольких взаимосвязанных компонентов природных вод: смола поглощает фульвовые и гуминовые кислоты вместе с катионами железа, а оно в свою очередь увлекает за собой ту часть $P_{\text{мин}}$ и $P_{\text{общ}}$, которая была связана с ним. При этом необходимо иметь в виду, что в ходе проведения адсорбции осаждаются и взвешенные вещества, поэтому разность $P_{\text{общ}}$ до и после адсорбции характеризует сумму взвешенного и железосвязанного фосфора. Следовательно, для определения концентрации последнего из этой суммы необходимо вычесть концентрацию $P_{\text{взв}}$, найденную при центрифугировании проб воды (табл. 2). В некоторых пробах воды, особенно эвтрофных озер (оз. Крошнозеро, Яндомозеро), в летний период 2011 г. содержащих большое количество планктоногенного ОВ, концентрация фосфора после адсорбции оказалась выше, чем после центрифугирования. Это можно объяснить тем, что при центрифугировании проб происходит частичное осаждение железосвязанного фосфора. После адсорбции проб воды на ДЭАЭ-целлюлозе и удаления взвешенного и железосвязанного фосфора в растворе остается часть органического фосфора, входящая

в состав ОВ автохтонного происхождения – фосфорилированных углеводов, липидов, нуклеиновых кислот и продуктов их частичной деградации [Stevens, Stewart, 1982].

Как видно из таблиц 2 и 4, концентрация $P_{\text{орг}}$ изменяется в очень широких пределах в вегетационный период 2011 г., а в среднегодовом плане по результатам 2012–2013 гг. она отличается достаточной стабильностью для различных групп водных объектов. Из полученных данных видно, что органический фосфор вносит существенный вклад в общее содержание этого элемента (около 85 % от $P_{\text{общ}}$).

Данные, полученные нами для большого числа обследованных в 2011 г. озер, позволили оценить зависимость содержания важнейших форм фосфора ($P_{\text{общ}}$, $P_{\text{мин}}$, $P_{\text{взв}}$ и $P_{\text{Fe-связ}}$) от уровня трофии водоемов (рис. 3). Как видно из этого рисунка, для всех групп озер наблюдается одинаковая закономерность: наибольшее содержание всех форм фосфора отмечено в эвтрофных водоемах, а наименьшее – в олиготрофных. Относительное содержание основных форм фосфора также постоянно для озер различного трофического статуса. Наибольшая доля приходится на взвешенный фосфор, а относительное содержание железосвязанного фосфора также достаточно велико. Так, в мезотрофных озерах его доля сопоставима с долей взвешенного фосфора. Минеральный фосфор составляет наименьшее относительное содержание во всех группах озер.

Таблица 4. Среднегодовые концентрации различных форм фосфора в исследованных водоемах в 2012–2013 гг.

| Водный объект | Формы фосфора, мкг/л | | | | | | | |
|----------------------|----------------------|------------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|----------------------|
| | До адсорбции | | | После адсорбции | | Расчетные | | |
| | $P_{\text{общ}}$ | $P_{\text{мин}}$ | $P_{\text{раст}}$ | $P_{\text{общ}}$ | $P_{\text{мин}}$ | $P_{\text{орг}}$ | $P_{\text{взв}}$ | $P_{\text{Fe-связ}}$ |
| 2012 г. | | | | | | | | |
| оз. Урозеро | 8 | 3 | - | 4 | 2 | 5 | - | - |
| оз. Крошнозеро | 63 | 23 | 36 | 25 | 10 | 40 | 27 | 11 |
| оз. Урос | 8 | 1 | 4 | 3 | 1 | 7 | 4 | 1 |
| оз. Вендюрское | 17 | 2 | 7 | 3 | 2 | 15 | 10 | 4 |
| оз. Святозеро | 91 | 15 | 22 | 15 | 7 | 76 | 69 | 7 |
| оз. Вегарус | 16 | 3 | 7 | 6 | 2 | 13 | 9 | 1 |
| оз. Салонъярви | 21 | 2 | 9 | 6 | 2 | 19 | 12 | 3 |
| оз. Яндомозеро | 27 | 1 | 7 | 5 | 2 | 26 | 20 | 2 |
| оз. Валгомозеро | 20 | 2 | 8 | 6 | 2 | 18 | 12 | 2 |
| 2013 г. | | | | | | | | |
| оз. Онежское (центр) | 9 | 1 | 7 | 5 | 1 | 8 | 2 | 2 |
| Петрозаводская губа | 21 | 3 | 13 | 9 | 1 | 18 | 8 | 4 |
| Кондопожская губа | 23 | 7 | 15 | 11 | 3 | 16 | 8 | 4 |
| р. Шуя (устье) | 51 | 10 | 30 | 18 | 4 | 41 | 21 | 12 |
| оз. Шотозеро | 29 | 4 | 23 | 15 | 2 | 25 | 6 | 8 |
| оз. Сямозеро | 28 | 6 | 14 | 11 | 3 | 22 | 14 | 3 |
| оз. Каменное | 10 | 1 | 7 | 5 | 0 | 9 | 3 | 2 |
| губа Камалахта | 9 | 1 | 8 | 6 | 1 | 8 | 1 | 2 |

Как видно из рисунка 3, закономерности распределения $P_{\text{орг}}$ в целом совпадают с аналогичными тенденциями для общего, взвешенного и минерального фосфора. Что касается абсолютных значений концентраций $P_{\text{орг}}$, то они несколько выше, чем тот же показатель $P_{\text{мин}}$ и $P_{\text{взв}}$ во всех группах озер.

В 2012–2013 гг. проводились сезонные исследования распределения различных форм фосфора в выбранных водоемах (рис. 1). По среднегодовому содержанию $P_{\text{общ}}$ к олиготрофным (≤ 11 мкг/л) были причислены: Урозеро, Урос, Вендюрское, Вегарусъярви, Онежское (центральная часть озера) и Каменное; к мезотрофным (20 мкг/л) – Салонъярви, Валгомозеро, Яндомозеро, Шотозеро, Сямозеро, Петрозаводская и Кондопожская губы Онежского озера и к эвтрофным (53 мкг/л) – Святозеро, Крошнозеро и река Шуя.

Среднегодовое содержание $P_{\text{мин}}$ и $P_{\text{общ}}$ в целом соответствовало трофическому статусу озер (табл. 4). Для олиготрофных водоемов концентрация $P_{\text{мин}}$ не превышала 5 (в среднем 2) мкг/л, а $P_{\text{общ}}$ – 11 (в среднем 8) мкг/л. В эвтрофных озерах эти значения были намного выше: $P_{\text{мин}}$ – до 34, а $P_{\text{общ}}$ – до 68 мкг/л. В оз. Святозеро в летний период была зафиксирована аномально высокая концентрация $P_{\text{общ}}$ – 222 мкг/л, когда в нем наблюдалось интенсивное цветение воды. Это связано

с тем, что отбор проб осуществлялся в истоке озер, который был забит большим количеством планктоногенной взвеси. Аналогичная ситуация наблюдалась в оз. Крошнозеро летом 2011 г. Что касается взвешенного фосфора, то его концентрация изменялась в широких пределах от 1 до 36 мкг/л. Наименьшие значения были отмечены для олиготрофных озер Урос, Каменное и центральной части Онежского озера, а максимальные – для эвтрофных водоемов Крошнозеро, Святозеро, р. Шуя и мезотрофного оз. Яндомозеро. Среднегодовое содержание железосвязанного фосфора в исследованных водных объектах составило 2–30 мкг/л, а его доля от $P_{\text{общ}}$ – около 15%. То есть обработка проб воды на ДЭАЭ-целлюлозе дает возможность оценить не только содержание органических веществ аллохтонного происхождения (гуминовых и фульвовых кислот), но и долю железосвязанного с ними фосфора.

В таблице 5 приведены среднегодовые концентрации железа общего и величины ПО в исходной, центрифугированной воде и в воде после адсорбции гумусовых веществ в исследуемых водоемах в 2012–2013 г. В целом наблюдается сходная с данными летнего периода 2011 г. картина, а именно – снижение содержания $Fe_{\text{общ}}$ и значения ПО после удаления взвешенных и гумусовых веществ. Степень

Таблица 5. Средние концентрации $Fe_{\text{общ}}$ и величины ПО в исходной, центрифугированной воде и после адсорбции гуминовых веществ в выбранных водоемах в 2012–2013 гг.

| Водный объект | $Fe_{\text{общ}}$, мг/л | | | % адсорб. $Fe_{\text{общ}}$ | ПО, мгО/л | | |
|----------------------|--------------------------|--------|-----------------|-----------------------------|-----------|--------|-----------------|
| | исходная | центр. | после адсорбции | | исходная | центр. | после адсорбции |
| 2012 г. | | | | | | | |
| оз. Урозера | 0,06 | - | 0,03 | 56 | 3,0 | 2,9 | 0,8 |
| оз. Крошнозеро | 0,59 | - | 0,19 | 68 | 16,6 | 13,9 | 3,7 |
| оз. Урос | 0,13 | 0,06 | 0,04 | 74 | 5,1 | 3,9 | 1,5 |
| оз. Вендорское | 0,21 | 0,1 | 0,08 | 63 | 7,7 | 7,6 | 2,1 |
| оз. Святозеро | 0,15 | 0,05 | 0,03 | 80 | 6,7 | 6,4 | 2,1 |
| оз. Вегарус | 0,68 | - | 0,39 | 42 | 18,9 | 18,8 | 4,0 |
| оз. Салонъярви | 0,84 | - | 0,29 | 65 | 25,9 | 25,3 | 4,6 |
| оз. Яндомозера | 0,20 | - | 0,07 | 64 | 10,3 | 8,5 | 2,5 |
| оз. Валгомозера | 0,06 | - | 0,03 | 50 | 7,7 | 7,1 | 3,8 |
| 2013 г. | | | | | | | |
| оз. Онежское (центр) | 0,12 | 0,05 | 0,02 | 83 | 7,6 | 7,5 | 2,1 |
| Петрозаводская губа | 0,16 | 0,16 | 0,09 | 44 | 9,4 | 9,3 | 2,8 |
| Кондопожская губа | 0,15 | 0,07 | 0,05 | 67 | 9,0 | 8,7 | 2,4 |
| р. Шуя | 1,07 | 0,57 | 0,29 | 73 | 18,1 | 17,4 | 5,0 |
| оз. Шотозера | 1,23 | 0,71 | 0,35 | 72 | 23 | 22,2 | 3,7 |
| оз. Сямозера | 0,42 | 0,20 | 0,17 | 60 | 9,8 | 9,5 | 3,3 |
| оз. Каменное | 0,18 | - | - | - | 8,6 | 8,3 | 2,5 |
| губа Камалахта | 0,46 | - | - | - | 14,2 | 13,6 | 4,5 |

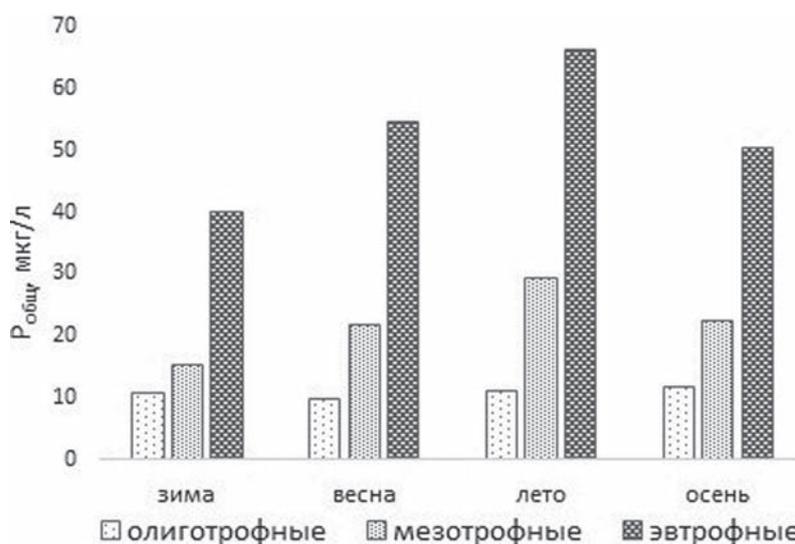


Рис. 4. Сезонное распределение общего фосфора в водных объектах Карелии с различным уровнем трофии в 2012–2013 гг.

адсорбции железа общего составляет 42–83 % для различных водоемов и в среднем достигает 64 %.

Что касается сезонной зависимости, то по данным 2012–2013 гг. она лучше всего проявляется для $P_{\text{общ}}$ вследствие более высокой его концентрации. Накопление $P_{\text{общ}}$ в воде происходит в весенний и особенно в летний сезон (рис. 4). Также в этих условиях замедляется процесс захоронения фосфора

в донных отложениях. Наиболее это заметно для эвтрофных водоемов, в которых в вегетационный период концентрация $P_{\text{общ}}$ практически достигает 70 мг/л (в оз. Святозеро, как указывалось выше, 222 мг/л). В то же время олиготрофные озера характеризуются слабой сезонной изменчивостью содержания общего фосфора.

Сезонное распределение основных форм фосфора было изучено для различных (по

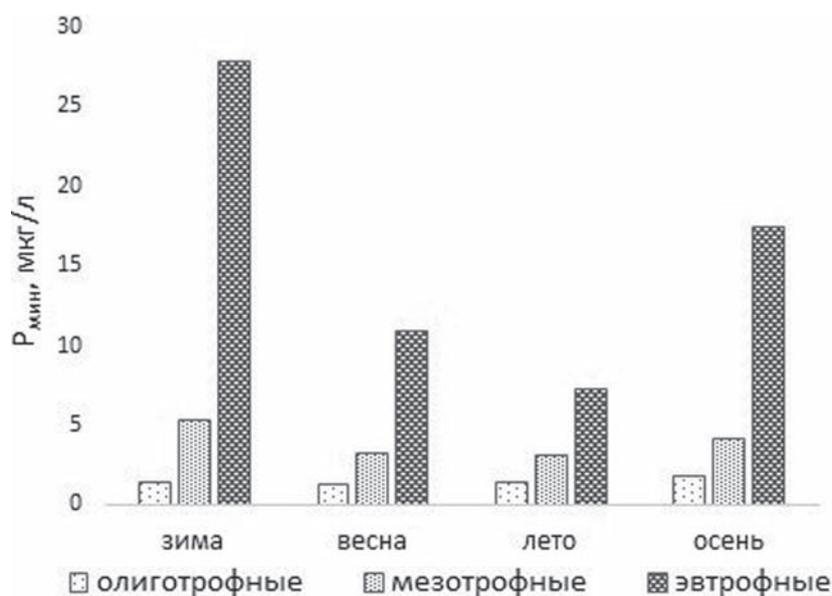


Рис. 5. Содержание минерального фосфора в разнотипных водоемах в 2012–2013 гг. в различные гидрологические сезоны

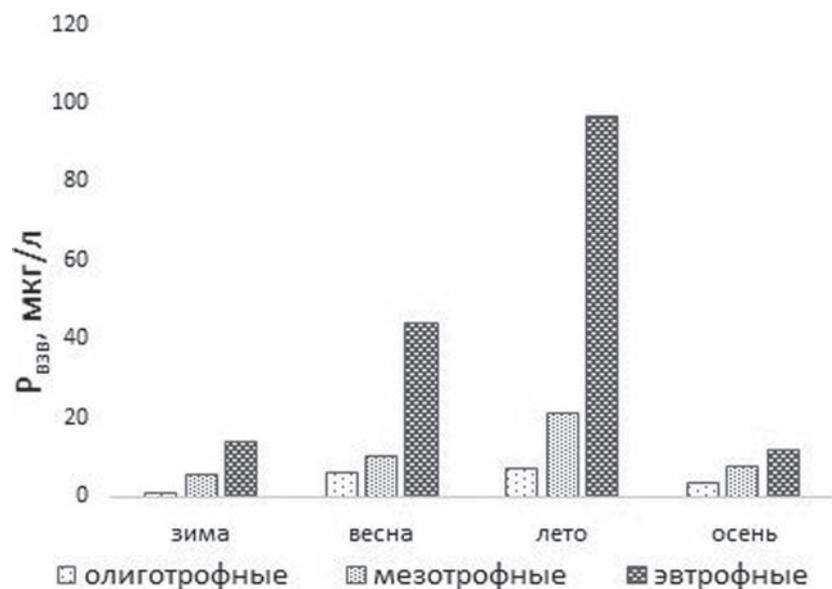


Рис. 6. Содержание взвешенного фосфора в разнотипных водоемах в 2012–2013 гг. в различные гидрологические сезоны

уровню трофии) озер по данным 2012–2013 гг. (рис. 5–7, 9). Как видно из рисунка 5, содержание $P_{\text{мин}}$, как и $P_{\text{общ}}$, выше всего в эвтрофных озерах (7–28 мкг/л), а меньше всего – в олиготрофных (1–2 мкг/л). Спад концентрации минерального фосфора приходится на весну и особенно на лето. Это можно объяснить резкой активизацией процесса первичной продукции ОВ в результате фотосинтеза, за счет чего происходит потребление $P_{\text{мин}}$ фитопланктоном. Похожая, но менее выраженная зависимость наблюдается и для мезотрофных озер, а для олиготрофных

вследствие очень низкого содержания $P_{\text{мин}}$ она практически не прослеживается.

С другой стороны, в сезонном распределении взвешенного фосфора наблюдается обратная зависимость (рис. 6). Накопление $P_{\text{взв}}$ происходит именно весной и особенно летом, как указывалось выше для $P_{\text{общ}}$, в результате вегетации планктона. Кроме того, резкое увеличение взвешенного фосфора в эвтрофных водоемах наблюдалось в период цветения воды. Так, в оз. Святозеро летом 2012 г. содержание $P_{\text{взв}}$ составило 192 мкг/л (86 % от $P_{\text{общ}}$).

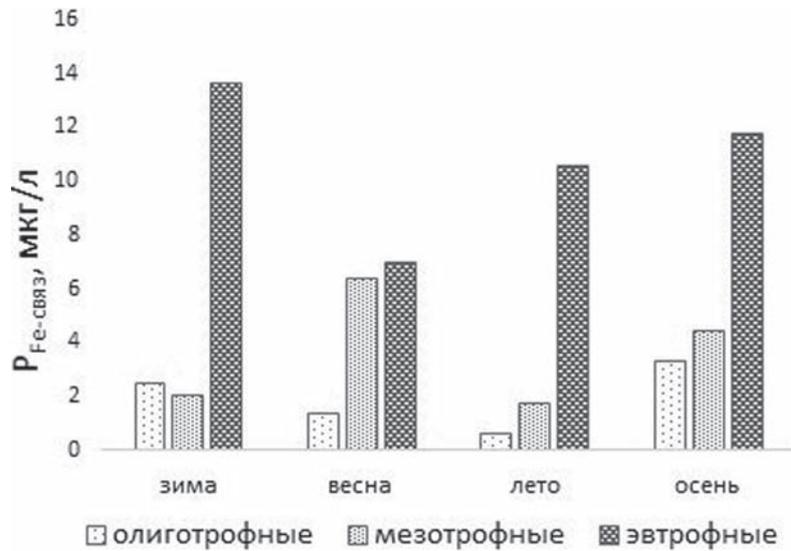


Рис. 7. Содержание Fe-связанного фосфора в разнотипных водоемах в 2012–2013 гг. в различные гидрологические сезоны

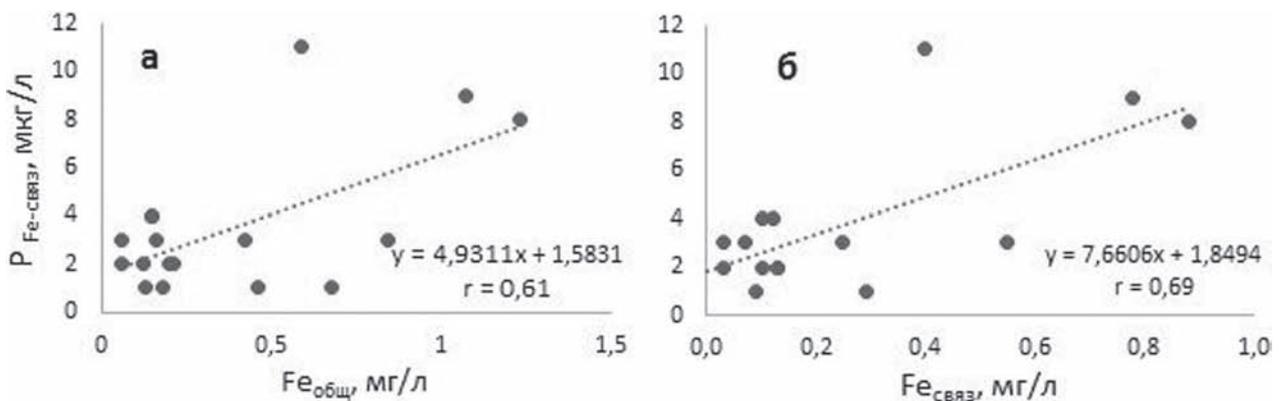


Рис. 8. Зависимость среднегодового содержания железосвязанного фосфора от концентрации общего (а) и связанного железа (б) в выбранных водных объектах в 2012–2013 гг.

Менее всего сезонной изменчивости подвержено распределение железосвязанного фосфора (рис. 7), что позволяет отнести его к консервативному химическому показателю состояния водного объекта. В эвтрофных озерах его содержание варьирует в пределах 23–26 мкг/л, в олиготрофных – 5–7 мкг/л, а в мезотрофных – 8–23 мкг/л. Очевидно, что концентрации $P_{\text{Fe-связ}}$ определяются в первую очередь содержанием $Fe_{\text{общ}}$ и ОВ в водоемах, а именно эти показатели относительно постоянны в сезонном плане.

В связи с этим нами были построены графики зависимости среднегодового содержания железосвязанного фосфора в исследованных в 2012–2013 гг. водных объектах от общего и связанного с гумусовыми веществами железа (после удаления их адсорбцией на ДЭАЭ-целлюлозе) (рис. 8). В обоих случаях (особенно во втором) получены удовлетворительные

корреляции, подтверждающие существование взаимосвязи концентрации железа и фосфора, связанного с ним, в водоемах гумидной зоны.

Что касается сезонного распределения $P_{\text{орг}}$, то наибольшее его содержание отмечено в вегетационный период, весной и летом, во всех группах озер (рис. 9). В этот период происходит активное потребление минерального фосфора бактерио- и фитопланктоном, в результате чего в водоемах накапливается $P_{\text{орг}}$. В осенний и зимний периоды, наоборот, происходит деструкция ОВ и активизируется накопление минерального фосфора.

На рисунке 10 показана зависимость концентрации $P_{\text{орг}}$ от содержания автохтонного ОВ ($XPK_{\text{авт}}$), подтверждающая взаимосвязь между этими показателями. Как было указано ранее, часть $P_{\text{орг}}$ входит в состав различных ОВ автохтонного происхождения, так что наличие этой зависимости является вполне логичным.

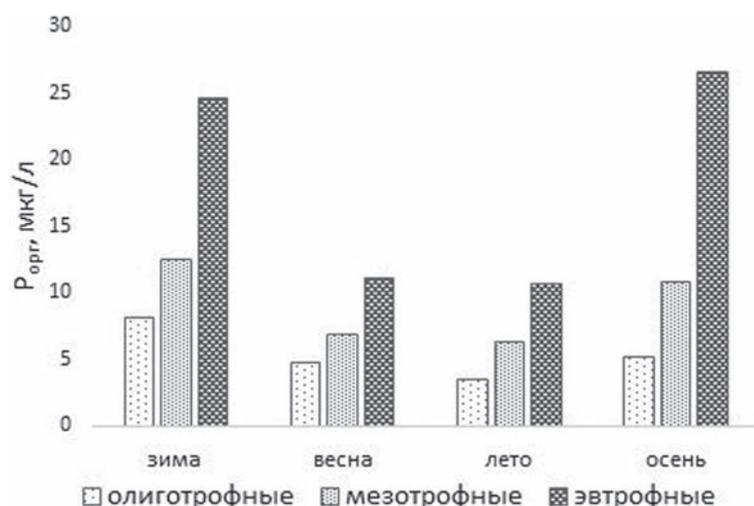


Рис. 9. Содержание органического фосфора в разнотипных водоемах в 2012–2013 гг. в различные гидрологические сезоны

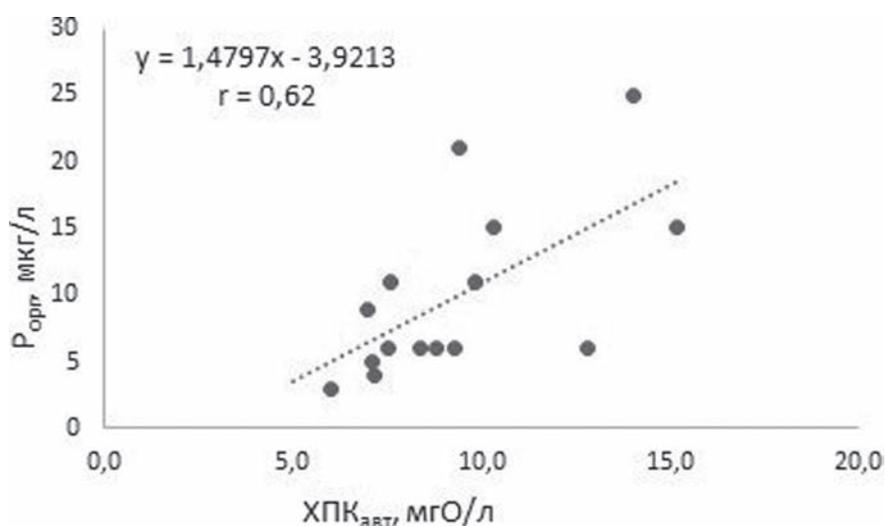


Рис. 10. Зависимость содержания органического фосфора от ХПК_{авт} в исследованных водоемах

Заключение

В большинстве озер (75 %) содержание $P_{\text{общ}}$ было менее 26 мкг/л, в 50 % озер оно находилось в пределах 10–26 мкг/л, в 25 % – менее 10 мкг/л. Проведенные в 2011–2013 гг. наблюдения на большом числе разнотипных водных объектов Карелии позволили установить основные закономерности содержания и распределения основных форм фосфора в водоемах гумидной зоны.

Минеральный, или «реакционноспособный», фосфор, представленный неорганическими фосфатами, составляет от 5 до 42 % (в среднем 15 %) от $P_{\text{общ}}$, а его концентрация наиболее подвержена сезонной изменчивости. Наименьшее его содержание наблюдается в вегетационный период за счет активного потребления фитопланктоном в результате процесса фотосинтеза.

Содержание взвешенного фосфора меняется в очень широких пределах – от 2 до 86 % (в среднем 40 %) от $P_{\text{общ}}$. Его доля возрастает в весенний и достигает максимума в летний период за счет активного фотосинтеза и поступления речных вод, содержащих большое количество взвешенных веществ. Наибольшим постоянством характеризуется концентрация железосвязанного фосфора, что является важной особенностью водоемов гумидной зоны. Некоторая часть его, по-видимому, входит в состав $P_{\text{взв}}$ и незначительно меняется от сезона года и составляет в среднем около 15 %. Получена хорошая корреляция между содержанием железа и железосвязанного фосфора в поверхностных водах гумидной зоны.

Органический фосфор вносит существенный вклад в общий баланс фосфора в выбранных водоемах. На его долю приходится около

85 % от $P_{\text{общ}}$. При этом следует отметить, что это относится как к фосфору, входящему в состав автохтонного ОВ, которое является лабильным и достаточно легко подвергается трансформации, так и к $P_{\text{орг}}$, связанному с аллохтонным ОВ, который попадает в состав взвешенного и железосвязанного фосфора, но эту долю оценить достаточно сложно.

Составлен баланс содержания основных форм фосфора – минерального, взвешенного, железосвязанного и органического в составе общего (валового) фосфора. При разработанном нами методическом подходе некоторые формы этого элемента попадают в различные из перечисленных групп, например, $P_{\text{Fe-связ}}$ частично может входить в состав $P_{\text{взв}}$, а $P_{\text{орг}}$ – во все остальные группы. Поэтому их сумма несколько превышает валовое содержание $P_{\text{общ}}$ в исходной воде (в среднем 10–20 %). Тем не менее нам удалось с достаточной степенью достоверности оценить вклад каждой из этих форм фосфора в его общий баланс.

Литература

Алекин О. О. Основы гидрохимии. Л.: Гидрометеорологическое изд-во, 1970. 444 с.

Линник П. И., Набиванец Б. И. Формы миграции металлов в пресных поверхностных водах. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 270 с.

References

Alekin O. O. *Osnovy gidrokhimii* [Principles of hydrochemistry]. Leningrad: Gidrometeorologicheskoe izd-vo, 1970. 444 p.

Linnik P. I., Nabivanec B. I. *Formy migracii metallov v presnykh poverhnostnykh vodah* [Forms of metal migration in fresh surface waters]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1986. 270 p.

Lozovik P. A. *Gidrogeohimicheskie kriterii sostojanija poverhnostnykh vod gumidnoj zony i ih ustojchivosti k antropogennomu vozdeystviyu* [Hydrogeochemical criteria of the state of surface waters the in humid zone and their tolerance to anthropogenic impact]: Summary of DSc. (Dr. of Chem.). Petrozavodsk, 2006. 60 p.

Lozovik P. A. *Geokhimicheskaya klassifikatsiya poverkhnostnykh vod gumidnoi zony na osnove ikh kislotno-osnovnogo ravnovesiya* [Geochemical classification of surface waters in humid zone based on their acid – base equilibrium]. *Vodnye resursy* [Water resources]. 2013. Vol. 40, no. 6. P. 583–593. doi: 10.7868/S0321059613060072

Lozovik P. A., Musatova M. V. *Metodika razdelenija organicheskogo veshhestva prirodnykh vod adsorbaciej na dijetilaminojetilcelljuloze na avtohtonnuju i allohtonnuju*

Lozovik P. A. Gidrogeohimicheskie kriterii sostojanija poverhnostnykh vod gumidnoj zony i ih ustojchivosti k antropogennomu vozdeystviyu: avtorref. dis. ... dokt. him. nauk. Petrozavodsk, 2006. 60 s.

Lozovik P. A. *Geokhimicheskaya klassifikatsiya poverhnostnykh vod gumidnoj zony na osnove ikh kislotno-osnovnogo ravnovesiya* // *Vodnye resursy*. 2013. T. 40, № 6. С. 583–593. doi: 10.7868/S0321059613060072

Lozovik P. A., Musatova M. V. *Metodika razdelenija organicheskogo veshhestva prirodnykh vod adsorbaciej na dijetilaminojetilcelljuloze na avtohtonnuju i allohtonnuju sostavljajushhie* // *Vestnik MГОУ*. Серия: Естественные науки. 2013. № 3. С. 63–68.

Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши. Часть 1 / Под ред. Л. В. Боевой. Ростов-на-Дону: НОК, 2009. 1044 с.

Linnik P. N., Ivanechko Ya. S., Linnik R. P., Zhezherya V. A. *Humic Substances in Surface Waters of the Ukraine* // *Russ. J. Gen. Chem.* 2013. Vol. 83, no. 13. P. 2715–2730. doi: 10.1134/S1070363213130185

Ryzhakov A. V., Sabylina A. V. *Phosphatase Activity and Turnover Rate in Lakes Ladoga and Onega* // *Russ. J. Gen. Chem.* 2015. Vol. 85, no. 13. P. 2938–2941. doi: 10.1134/S1070363215130101

Stevens R. J., Stewart B. M. *Concentration, fractionation and characterisation of soluble organic phosphorus in river water entering Lough Neagh* // *Water Research*. 1982. Vol. 16, no. 11. P. 1507–1519.

Поступила в редакцию 11.02.2016

sostavlajajushhie [Separation of organic materials of nature waters into autochthonous and allochthonous components by diethylaminoethyl-cellulose adsorption]. *Vestnik MГОУ*. Serija: Estestvennye nauki [Bulletin MSRU. Ser. Natural sciences]. 2013. No. 3. P. 63–68.

Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши. Част' 1 [Manual on chemical analysis of surface waters. Pt. 1]. Ed. L. V. Boevaja. Rostov-on-Don: NOK, 2009. 1044 p.

Linnik P. N., Ivanechko Ya. S., Linnik R. P., Zhezherya V. A. *Humic Substances in Surface Waters of the Ukraine*. *Russ. J. Gen. Chem.* 2013. Vol. 83, no. 13. P. 2715–2730. doi: 10.1134/S1070363213130185

Ryzhakov A. V., Sabylina A. V. *Phosphatase Activity and Turnover Rate in Lakes Ladoga and Onega*. *Russ. J. Gen. Chem.* 2015. Vol. 85, no. 13. P. 2938–2941. doi: 10.1134/S1070363215130101

Stevens R. J., Stewart B. M. *Concentration, fractionation and characterisation of soluble organic phosphorus in river water entering Lough Neagh*. *Water Research*. 1982. Vol. 16, no. 11. P. 1507–1519.

Received February 11, 2016

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Рыжаков Александр Вадимович

старший научный сотрудник лаб. гидрохимии
и гидрогеологии, к. х. н., доц.
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
тел.: (8142) 576541

Зобкова Мария Валентиновна

главный химик лаборатории гидрохимии и гидрогеологии
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: rincalika21@yandex.ru
тел.: (8142) 576541

Лозовик Петр Александрович

зав. лабораторией гидрохимии и гидрогеологии, д. х. н.
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: lozovik@nwpi.krc.karelia.ru
тел.: (8142) 576541

CONTRIBUTORS:

Ryzhakov, Aleksandr

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
tel.: (8142) 576541

Zobkova, Mariya

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: rincalika21@yandex.ru
tel.: (8142) 576541

Lozovik, Petr

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: lozovik@nwpi.krc.karelia.ru
tel.: (8142) 576541

УДК 556.1:556.334:556.114.6.027 (470.2)

ВОДООБМЕН В КРАЕВЫХ ЧАСТЯХ БАЛТИЙСКОГО ЩИТА И ПРИЛЕГАЮЩИХ АРТЕЗИАНСКИХ БАССЕЙНАХ ПО ИЗОТОПНЫМ И ХИМИЧЕСКИМ ДАННЫМ (НАУЧНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ). КАРЕЛЬСКИЙ ПЕРЕШЕЕК

**Г. Ю. Воронюк¹, Г. С. Бородулина², И. А. Крайнюкова³,
И. В. Токарев³**

¹ *Петербургская комплексная геологическая экспедиция, Росгеология*

² *Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН*

³ *Санкт-Петербургский государственный университет, Научный парк, РЦ «Геомодель»*

Исследован химический и изотопный состав воды (содержание дейтерия и кислорода-18), а также активности трития в подземных водах вендского и рифейского водоносных комплексов на Карельском перешейке – территории, активно развивающейся в хозяйственно-экономическом отношении. Для области питания вендского комплекса оценка темпов водообмена по тритию дает возрасты подземных вод до 100 лет, а в области распространения перекрывающего котлинского водопора по радий/радоновому методу – от нескольких сотен до нескольких тысяч лет. Изотопные данные ($\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$) указывают, что на площади развития котлинских глин отсутствует площадное инфильтрационное питание вендского комплекса, он защищен от загрязнения с поверхности, а его ресурсы обеспечены преимущественно боковым притоком. В Ладожском грабене, по-видимому, господствует режим замедленного водообмена, так как на глубине 250 м по изотопно-гидрохимическим критериям идентифицируются реликтовые воды Балтийского ледникового озера.

Ключевые слова: Карельский перешеек; подземные воды; химический и изотопный состав; условия формирования ресурсов; время водообмена; защищенность.

**G. Yu. Vroniuk, G. S. Borodulina, I. A. Krainyukova, I. V. Tokarev.
GROUNDWATER EXCHANGE IN THE BALTIC SHIELD MARGINAL
AREAS AND ADJACENT ARTESIAN BASINS BASED ON ISOTOPE AND
HYDROCHEMISTRY DATA. SCIENTIFIC PROBLEMS AND PRACTICAL
APPLICATIONS. KARELIAN ISTHMUS**

Water chemical and isotopic composition (deuterium content and oxygen-18), as well as the activity of tritium in groundwater of Riphean aquifer and Vendian complex in the Karelian Isthmus were studied. Estimation of recharge rate for groundwater of the Vendian complex by tritium yielded groundwater ages up to 100 years for this area, which is located not far from Central Karelian watershed. For the area where the Vendian complex is overlapped by the Kotlin aquiclude, water age varied from several hundreds to several thousands years as determined by the radium/radon method. Isotopic data ($\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$)

indicate that the Vendian complex has no recharge there, and the complex is therefore protected from contamination from the surface, and at the same time its resources are mainly supplied by lateral inflow. The Ladoga graben is apparently dominated by slow water exchange regime, given that at a depth of 250 m relict waters of the Baltic Ice Lake were identified by isotope and hydrochemical criteria.

Key words: Karelian Isthmus; groundwater; chemical and isotopic composition; conditions of resource formation; water exchange time; protection against pollution.

Введение

Вендский водоносный комплекс (ВВК) в пределах Карельского перешейка является основным источником водоснабжения [Кармазинов, 2003; Закон..., 2006; Игнатъев и др., 2015]. Интенсивная эксплуатация ВВК связана с возрастанием водопотребления вследствие активного хозяйственно-экономического развития территории. Удобство эксплуатации ВВК обусловлено удовлетворительным, как правило, качеством воды, выдержанностью комплекса по площади и разрезу, а также защищенностью от загрязнения с поверхности. Между тем обоснование плана развития на перспективу нуждается в прогнозной оценке ресурсов и качества подземных вод, а также в выработке управляющих решений для последующего регулирования водопользования.

Наиболее современным подходом к задаче прогноза является создание гидрогеологических карт нового поколения, состоящих из электронной версии «бесшовной» карты, базы данных и набора постоянно действующих численных моделей. Некоторые элементы такого комплекса для Карельского перешейка уже имеются. В 1980-х годах была создана первая региональная численная гидродинамическая модель [Широкова, Рошаль, 1982], а в 2005 г. выполнена региональная переоценка запасов на базе актуализированной модели [Баскова, Воронюк, 2013]. В 2007–2014 гг. проведено гидрогеологическое доизучение масштаба 1:200 000, выполнена оценка защищенности и прогнозных ресурсов подземных вод по категории P_2 , создан комплект электронных карт в формате геоинформационных систем и базы данных [Игнатъев и др., 2015].

В статье демонстрируется возможность использования информации об изотопном составе воды (содержаниях дейтерия – δ^2H и кислорода-18 – $\delta^{18}O$) и концентрациях трития (3H) для улучшения интерпретации результатов региональных гидрогеологических работ.

Описание района

Карельский перешеек в геолого-гидрогеологическом отношении представляет собой

сочленение Восточно-Европейского артезианского бассейна и Балтийского гидрогеологического массива [Баскова, Воронюк, 2013]. На севере территории на поверхность выходят древние кристаллические породы, мощность осадочного чехла увеличивается в направлении на юг и юго-восток (рис. 1). В зоне Ладожского грабена депрессию в кровле фундамента заполняют рифейские водоносные образования, представленные разнозернистыми песчаниками, достигающими мощности 500 м.

Базальная пачка чехла ВВК представляет собой нерегулярное переслаивание песчаных и глинистых разностей слабо литифицированных пород, как правило, с относительно более глинистой средней частью. Мощность комплекса изменяется от первых метров на северо-западе до 170 м на юго-востоке площади. Граница выклинивания комплекса имеет сложный вид и определяется положением Лемболовской возвышенности, современными речными долинами и палеоруслуями (рис. 1).

Вендский комплекс перекрыт котлинским (верхневендским) региональным водоупором, сложенным плотными пластичными глинами. Мощность водоупора достигает 118 м в юго-восточной части перешейка, граница выклинивания в северной и западной части территории также имеет сложный вид.

Четвертичные водоносные горизонты и водоупоры не выдержаны по мощности и проницаемости и распространенности в плане. Наиболее водообильны межморенные водоносные горизонты (ММВГ). Как правило, наибольшая их мощность приурочена к участкам распространения речных палеодолин.

Питание подземных вод четвертичных горизонтов осуществляется за счет прямой площадной инфильтрации атмосферных осадков, а ММВГ, в некоторых случаях, – за счет бокового подтока. Основное питание вендского комплекса поступает со стороны Лемболовской возвышенности, то есть определяется латеральным региональным потоком подземных вод. Исключение составляют локальные зоны палеодолин и гидрогеологических окон, на участках развития которых вопрос о темпах

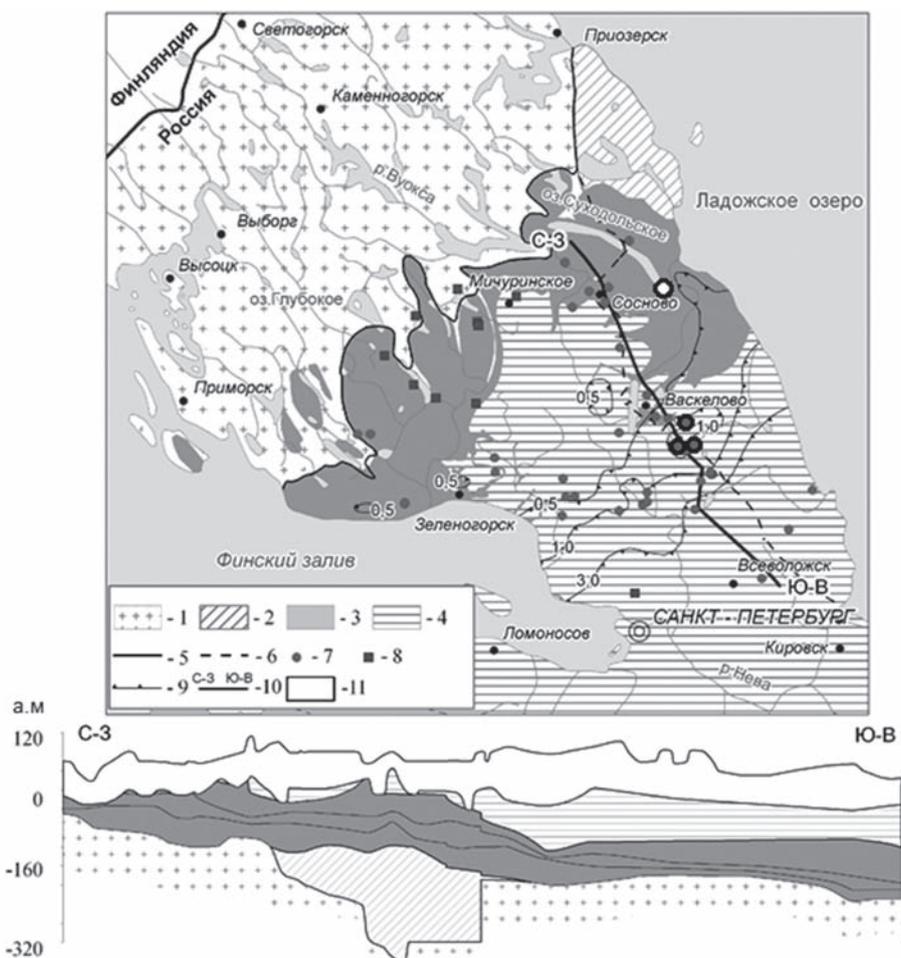


Рис. 1. Схема площади исследований (со снятым чехлом четвертичных отложений):

1 – кристаллические породы; 2–4 осадочный чехол: 2 – рифейский ВК, 3 – вендский ВК, 4 – верхневендский (котлинский) региональный водоупор; 5 – граница между шитом и платформой; 6 – граница Ладожского и Балтийского гидрогеологических районов; 7 – точки опробования подземных вод на дейтерий и кислород-18 (крупным значком с белой заливкой выделена скважина № 13 в пос. Луговое, крупными значками с серой заливкой – скважины в пос. Куйвозы, Заводском и СНТ «Карелия», см. ниже); 8 – точки опробования подземных вод на тритий; 9 – изолинии минерализации вод ВВК (г/л); 10 – линия разреза; 11 – четвертичный водоносный комплекс (показан только на разрезе)

и направлении перетекания остается открытым [Баскова, Воронюк, 2013].

Учетный отбор подземных вод Карельского перешейка на 2012 г. составлял 37 тыс. м³/сут [Баскова, Воронюк, 2013; Игнатъев и др., 2015]. Нарращивание водоснабжения на Карельском перешейке возможно за счет как межморенных горизонтов, так и вендского комплекса. Ресурсы грунтового горизонта и ММВГ определены в объеме 408 тыс. м³/сут [Баскова, Воронюк, 2013]. Однако отметим, что сложное строение межморенных горизонтов затрудняет оценку их ресурсов. Кроме того, в значительной части случаев в подземных водах ММВГ обнаруживается повышенное содержание Fe, Mn, NH₄⁺, связанное с природной обстановкой,

а в некоторых случаях также Cd, Cr и NH₄⁺, по-видимому, вследствие техногенного загрязнения [Токарев и др., 2013; Баскова, Воронюк, 2013].

Эксплуатация ВВК предоставляет существенные выгоды вследствие его выдержанности по площади и разрезу, а также защищенности от перетекания с поверхности. Поэтому рассмотрим данные по вендскому комплексу более детально.

Запасы ВВК оценены в объеме 156 тыс. м³/сут при сложившейся схеме водозаборов, а по данным моделирования могут быть увеличены до 260 тыс. м³/сут при оптимизации системы водоотбора [Баскова, Воронюк, 2013]. Однако расширение водоотбора может иметь

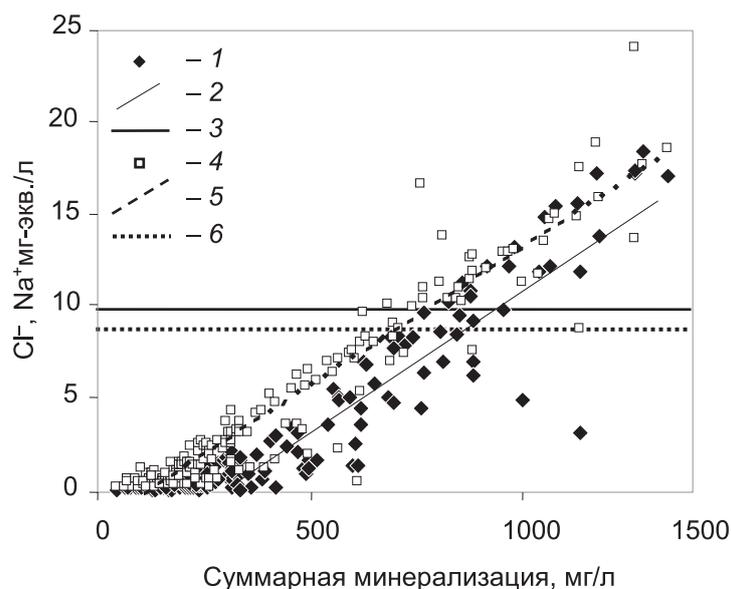


Рис. 2. Соотношение содержания хлоридов и натрия в водах межморенных горизонтов и вендского комплекса:

1 – содержание Cl^- ; 2 – линия аппроксимации данных по Cl^- ; 3 – ПДК для Cl^- ; 4 – содержание Na^+ ; 5 – линия аппроксимации опытных данных по Na^+ , 6 – ПДК для Na^+

следствием сверхэксплуатацию ВВК, поскольку его извлекаемые запасы на значительной площади формируются за счет упругой водоотдачи и латерального потока.

В 1970-х годах в связи с интенсивным отбором воды для технических нужд произошло первое снижение напоров в ВВК, оцениваемое величиной около 70 м. Центр депрессионной воронки располагался в пределах городской черты, где восстановление напоров с конца 1980-х до начала 2000-х годов составило примерно 60 м. В последние годы напоры в ВВК снова начали снижаться, но теперь уже в связи с отбором воды в северной части Санкт-Петербурга и на Карельском перешейке. На начало 2014 г. учтенный водоотбор из ВВК составил около 27 тыс. м³/сут [Баскова, Воронюк, 2013; Игнатъев и др., 2015], а нелегализованный водоотбор для частных нужд экспертно оценивался соизмеримой величиной. В настоящее время площадь воронки достигает 20 тыс. км², протяженность по субширотной оси несколько превышает 100 км и 60 км – по субмеридиональной [Кармазинов, 2003; Игнатъев и др., 2015]. Центр тяготеет к пос. Черная Речка в 30 км на северо-запад от г. Санкт-Петербурга, где понижение достигает 60 м.

В вендском комплексе в направлении от области питания на юг и юго-восток наблюдается заметный рост минерализации, которая достигает 3 г/л на правом берегу р. Невы (рис. 1). Увеличение минерализации более

400 мг/л обусловлено ростом содержания Na^+ и Cl^- [Токарев и др., 2013]. Отметим, что превышение ПДК по Na^+ и Cl^- (200 и 350 мг/л соответственно) обнаруживается уже при минерализации 650–750 мг/л (рис. 2).

В юго-восточной части Карельского перешейка, там, где минерализация подземных вод, согласно схеме на рисунке 1, превышает 1,5 г/л, увеличение солёности наблюдается также с глубиной. Смещение центра тяжести водоотбора из ВВК на Карельский перешеек может со временем привести к перемещению контура солёных вод на север и их вертикальному подъёму в разрезе. Последнее может привести к выходу из строя уже действующих водозаборов, как это произошло, например, в Эстонии [Raidla et al., 2009].

Материалы и методы

Отбор проб воды на химический и прочие анализы производился в ходе опытных откачек или после достаточно продолжительных прокачек, а также из эксплуатационных скважин; сами анализы выполнялись по стандартным методикам в сертифицированных лабораториях. Отбор проб на тритий производился в стеклянную посуду (во избежание заражения проб тритием во время хранения, что особенно критично для подземных вод) объемом 0,3–0,5 л. Измерения выполнялись на низкофономом жидкостно-сцинтилляционном спектрометре Quantulus

Таблица 1. Содержание трития в подземных водах Карельского перешейка

| Расположение скважины | | Глубина | Водовмещающие породы | Минерализация воды, г/л | Концентрация трития, ТЕ* | Оценочный возраст, лет** |
|-----------------------|---|-------------------------|----------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Район | Населенный пункт (номер скважины по каталогу) | Интервал опробования, м | | | | |
| Выборгский | п. Вещево (53365) | $\frac{130}{80-130}$ | AR – PR ₁ | 0,20 | 10 ± 2 | < 10 |
| | п. Кирпичное (3252) | $\frac{75}{60,6-74,7}$ | llms – lllos | 0,14 | 14 ± 2 | < 10 |
| | п. Красносельское (27074) | $\frac{26}{22-26}$ | llms – lllos | 0,28 | 15 ± 2 | < 10 |
| | п. Пушное (3305) | $\frac{70}{50,2-56,6}$ | llms – lllos | 0,13 | 13 ± 1 | < 10 |
| | п. Краснозерное (74297) | $\frac{60}{43-60}$ | llms-lllos | 0,44 | 6 ± 1 | 10–100 |
| | п. Коробицино (3421) | $\frac{155}{146-155}$ | V | 0,20 | 9 ± 1 | 10–100 |
| | п. Коробицино (3401) | $\frac{100}{82-88}$ | llvl – ms | 0,13 | 8 ± 1 | 10–100 |
| | п. Первомайский (3280) | $\frac{159}{130-159}$ | V | | 7 ± 1 | 10–100 |
| | п. Цвелодубово (1543) | $\frac{110}{58-65}$ | llms – lllos | 0,09 | 9 ± 1 | 10–100 |
| Приозерский | п. Мичуринское (36865) | $\frac{170}{123-165}$ | V | 0,10 | 4 ± 1 | 100–500 |
| Санкт-Петербург | ул. Байконурская, 12 (94/3) | $\frac{83,5}{74-82}$ | llvl – ms | 0,23 | 12 ± 2 | < 10 |

Примечание. * Современный фон трития в атмосферных осадках региона 9–17 ТЕ [Kortelainen, 2009]; ** оценка согласно [Ферронский, Поляков, 2009].

Таблица 2. Оценка степени защищенности подземных вод по содержанию трития, используемая при построении карт масштаба 1:500 000 [Ферронский, Поляков, 2009]

| Степень защищенности | Содержание трития, ТЕ | Расчетное время проникновения компонента-загрязнителя в водоносный горизонт с поверхности, лет |
|-------------------------|-----------------------|--|
| Незащищенные | > 10 | < 10 |
| Слабо защищенные | 10–5 | 10–100 |
| Относительно защищенные | 5–3 | 100–500 |
| Защищенные | < 3 | > 500 |

после электролитического обогащения (ошибки измерений указаны в таблице). Отбор проб на изотопный состав воды производился в пластиковые виалы объемом 20–40 мл, анализ выполнялся на лазерном инфракрасном спектрометре Picarro L-2120i в Ресурсном центре «Геомодель» (Научный парк СПбГУ). Погрешность измерения составляла ±0,1‰ для δ¹⁸O и ±1‰ для δ²H. При отборе емкости заливались полностью для минимизации пузырька воздуха, до передачи в лабораторию пробы хранились в прохладном темном месте (в полевых условиях) или в холодильнике вниз горлом.

Результаты и обсуждение

Известно, что темп водообмена в подземных горизонтах контролируется главным

образом их положением относительно области питания и базиса дренирования. На Карельском перешейке значительная часть ВВК расположена гипсометрически существенно ниже региональных базисов дренирования – Финского залива, Ладожского озера и р. Невы, следовательно, на этих участках водообмен в нем должен быть замедлен.

Для ориентировочной оценки возраста подземных вод ВВК был использован радий/радоновый метод датирования [Гудзенко, Дубинчук, 1987]. Для северного берега Финского залива расчет дает среднее время пребывания воды в горизонте от 0,8 до 3,4 тыс. лет. Соответственно, можно принять, что в области развития верхнекотлинского водоупора загрязнение ВВК с поверхности практически исключено. Это также означает, что перетекание через

Таблица 3. Изотопный состав подземных вод Карельского перешейка и расчет температур воздуха в период выпадения атмосферных осадков, участвовавших в формировании инфильтрационного питания

| Местоположение (номер скважины по каталогу) | Водовмещающие породы | $\delta^{18}\text{O}^*$, ‰ | $\delta^2\text{H}^*$, ‰ | Средняя расчетная температура, °С |
|---|----------------------|--------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|
| пос. Васкелово (85) | V+R | -13,1 | -93 | 0,99 |
| пос. Верхние Осельки (12) | V | -13,3 | -95 | 0,66 |
| пос. Верхние Осельки (12) ** | V | -13,4 | -95 | 0,59 |
| СНТ*** «Карелия» | V | -14,4 | -103 | -0,85 |
| пос. Сосново (56682) | V | -12,7 | -88 | 1,72 |
| пос. Сосново (хлебзавод Петрохлеб) | R | -12,5 | -89 | 1,78 |
| пос. Луговое (13) | V+R | -13,4 | -93 | 0,77 |
| пос. Орехово (5/96) | V | -12,6 | -87 | 1,89 |
| пос. Заводской (б/н) | V | -14,0 | -103 | -0,56 |
| пос. Куйвози (б/н) | V | -14,2 | -104 | -0,79 |
| СНТ «Озерное» (б/н) | V | -12,3 | -88 | 2,01 |
| пос. Семиозерье (0403002) | V | -11,9 | -84 | 2,66 |
| пос. Приветинское (б/н) | V | -11,3 | -80 | 3,45 |
| пос. Поляны (б/н) | V | -11,8 | -83 | 2,82 |
| пос. Ильичево (63777) | V | -11,8 | -82 | 2,91 |
| пос. Ленинское (б/н) | V | -12,2 | -85 | 2,35 |
| г. Выборг (частная скважина около оз. Краснохолмское) | AR – PR ₁ | -12,5 | -88,3 | 1,84 |
| г. Выборг (родник) | AR – PR ₁ | -12,5 | -88,8 | 1,80 |
| Среднегодовая температура воздуха по метеонаблюдениям | | | | 4,3 |

Примечание. * Результаты приведены относительно стандарта средней океанической воды (SMOW); ** повторное опробование; *** садоводческое некоммерческое товарищество.

котлинские глины незначительно и делает сомнительным возможность привлечения дополнительных ресурсов из четвертичных горизонтов за счет площадного питания.

Для Карельского перешейка впервые было выполнено систематическое определение изотопного состава воды и содержания трития в различных горизонтах (рис. 1, 3; табл. 1, 3). По содержанию трития может быть выполнена приближенная оценка возраста подземных вод согласно [Ферронский, Поляков, 2009]. Из полученных количественных оценок следует, что в районе Лемболовских высот во всех горизонтах имеет место быстрый водообмен и, соответственно, относительно низкая защищенность подземных вод от загрязнения с поверхности (табл. 2).

Региональный тренд вариаций изотопного состава подземных вод соответствует локальной линии метеорных вод, аппроксимирующей изменение изотопного состава осадков на Карельском перешейке в 2012–2015 гг. (рис. 3). На диаграмме показаны также средние изотопные составы осадков за год и за холодный сезон, вычисленные по многолетним данным.

Под холодным сезоном понимается период, когда средняя суточная температура оказывается ниже +5 °С и влияние эвапотранспирации на водный баланс становится пренебрежимо мало. В этот период происходит основное влагонакопление и в том числе питание подземных вод (на Карельском перешейке это октябрь–апрель).

Сопоставление составов подземных вод и атмосферных осадков показывает, что первые формируются преимущественно за счет инфильтрации осадков холодного сезона (табл. 3). Преобладание питания подземных вод в период весеннего половодья подтверждается наблюдениями за уровнем подземных вод в режимных скважинах. Если принять во внимание только те пробы, которые содержат заметные активности трития, то в изотопном составе подземных вод, имеющих современное инфильтрационное питание, присутствует в среднем $\delta^{18}\text{O} = -12,4\text{‰}$ и $\delta^2\text{H} = -87\text{‰}$. Откуда, согласно [Dansgaard, 1964], средняя температура воздуха в период выпадения осадков, идущих на питание подземных вод ВВК, составляет +2,1 °С (в то время как современная

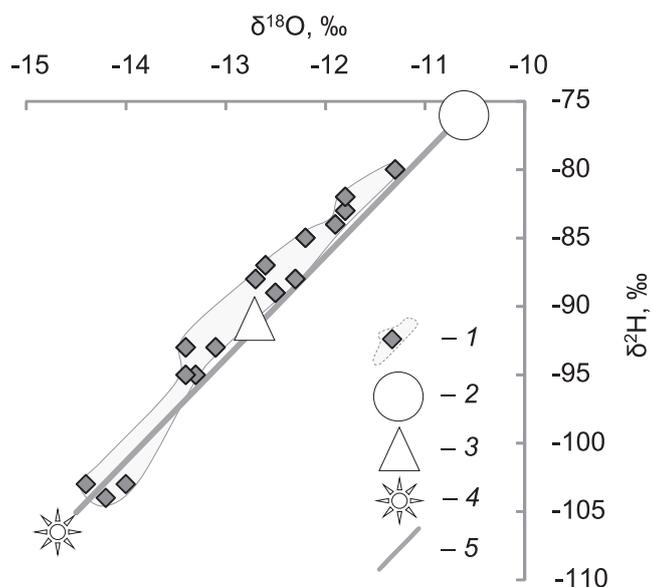


Рис. 3. Изотопный состав подземных вод вендского и рифейского комплексов на Карельском перешейке:

1 – индивидуальные измерения (залита область вариаций изотопного состава подземных вод ВВК, будет использована на следующем рисунке); 2 – средневзвешенный многолетний изотопный состав атмосферных осадков в районе Санкт-Петербурга с учетом вариаций объема выпадений и состава осадков во времени; 3 – средневзвешенные осадки холодного периода года; 4 – средний состав снега в зиму 2011–2012 и 2012–2013 гг.; 5 – локальная линия метеорных вод, оцененная по результатам мониторинга атмосферных осадков в 2012–2015 гг. на станциях «Петергоф» и «Ламмин-Суо»

среднегодовая температура по метеонаблюдениям $+4,3\text{ }^{\circ}\text{C}$).

При удалении от области питания в целом отмечается облегчение изотопного состава подземных вод ВВК. В некоторых случаях их изотопный состав оказывается существенно легче среднего изотопного состава осадков за холодный сезон и приближается к среднему составу снега (СНТ «Карелия», пос. Заводской и пос. Куйвози). Это позволяет предположить, что подземные воды, обнаруженные на данном участке, поступили в подземную гидросферу в относительно более холодных климатических условиях, чем современные (расчетная температура воздуха для них варьирует от $-0,56$ до $-0,85\text{ }^{\circ}\text{C}$, табл. 3). Последнее означает, что эти воды должны иметь достаточно большой возраст, а современное инфильтрационное питание на данной площади отсутствует.

Особый интерес вызывают результаты опробования подземных вод вендского и рифейского комплексов в районе юго-восточной оконечности оз. Суходольского, относительно недалеко от области питания ВВК. Особенностью геологического строения на этом участке

является отсутствие регионального котлинского водоупора и появление в составе ВВК слоя глин мощностью 20 м, который отделяет редкинский водоносный горизонт от вышележащего московско-осташковского.

Подземные воды опробовались скважиной глубиной 250 м, углубление которой выполнялось интервалами по 30 м, после чего осуществлялись выпуски (пос. Луговое, рис. 1; табл. 3). Нижняя часть ствола вскрыла кровлю рифейского ВК на абсолютной отметке $-75\text{...}-80$ м. Уровень подземных вод на конец проходки установился в 7 м над поверхностью земли ($+18$ м), что превышает отметку уреза воды в расположенном в 900 м к северу оз. Суходольском ($+6$ м). При вскрытии разреза произошло последовательное увеличение дебита выпуска с 500 до более чем $1000\text{ м}^3/\text{сут}$.

Минерализация воды в начале опробования составляла около 140 мг/л , а в конце, после вскрытия рифейских отложений, достигла 640 мг/л (рис. 4). Произошла смена состава подземных вод с $\text{HCO}_3\text{-Ca-Mg}$ на $\text{Cl-HCO}_3\text{-Na}$, а также заметно изменилось содержание некоторых микроэлементов.

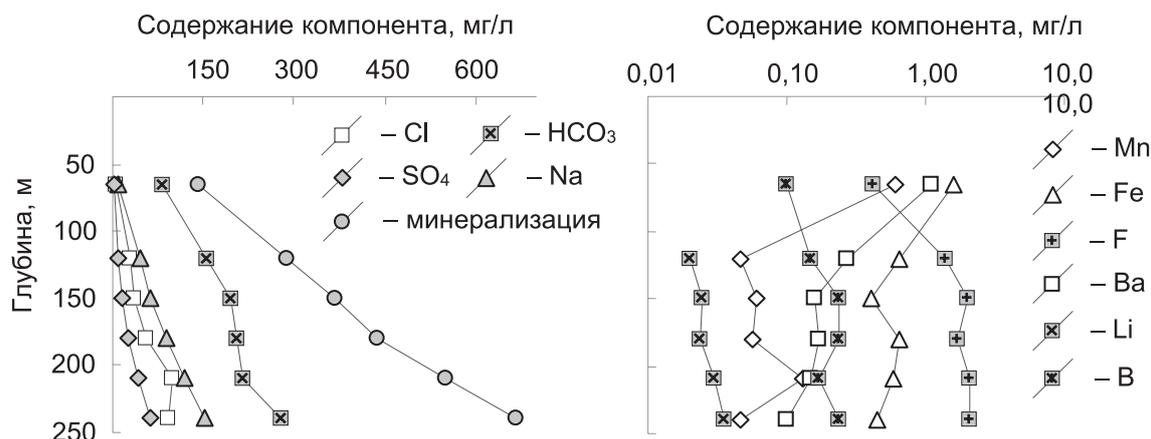


Рис. 4. Изменение химического состава воды в ходе опробования самоизливающей скважины в районе южной оконечности оз. Суходольское (пос. Луговое, табл. 3, положение скважины – см. рис. 1)

Одновременно с изменением химического облика наблюдалось значительное облегчение изотопного состава подземных вод (табл. 4). Это облегчение настолько велико, что воды рифейского комплекса оказываются изотопически легче, чем современный снег в среднем (рис. 5). Расчет температур воздуха в период образования осадков, согласно [Dansgaard, 1964], дает температуру воздуха в период формирования инфильтрационного питания $t = -3,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ и указывает на происхождение вод рифейского комплекса в эпоху с суровым климатом (табл. 4).

Аналогичная тенденция облегчения изотопного состава воды с глубиной обнаружена нами и для ломоносовского горизонта на территории южнее Финского залива. В районе г. Сосновый Бор, где этот горизонт выходит на поверхность, изотопный состав воды идентичен современным атмосферным осадкам (рис. 4). На водозаборе Ивангорода подземные воды ломоносовского горизонта вскрыты на глубине около 90 м. Здесь они оказываются заметно облегченными по изотопному составу, схожи с водой

рифейского ВК в районе пос. Лугового и не содержат трития. При дальнейшем движении на запад наблюдается экстремальное облегчение изотопного состава воды, вплоть до величин $\delta^{18}\text{O} \approx -22\text{‰}$ и $\delta^2\text{H} \approx -170\text{‰}$ на Таллинском водозаборе. Для этого участка надежно доказано [Raidla et al., 2009], что воды ломоносовского горизонта представляют собой реликты воды Балтийского ледникового озера, существовавшего на месте Балтийского моря около 13 тыс. лет назад [Climate..., 2010].

Выводы

Хозяйственное освоение Карельского пещерника ведет к существенному росту водопотребления, в связи с чем важной является оценка ресурсов и качества подземных вод, а также их защищенности от загрязнения. Улучшение таких оценок может быть достигнуто на базе изотопных методов, позволяющих установить темп водообмена, рассчитать ресурсы подземных вод, а также интенсивность перетекания через региональные водоупоры.

Таблица 4. Изменение изотопного состава воды в ходе поинтервального опробования самоизливающей скважины (пос. Луговое, рис. 1, табл. 3) и расчет температуры воздуха в период образования осадков

| Глубина отбора пробы, м | Вмещающие породы | $\delta^{18}\text{O}$, ‰ | $\delta^2\text{H}$, ‰ | Средняя расчетная температура*, °C |
|-------------------------|------------------|---------------------------|------------------------|------------------------------------|
| 94 | V | -13,4 | -93 | 0,8 |
| 120 | V | -13,7 | -96 | 0,3 |
| 150 | V | -14,2 | -100 | -0,4 |
| 180 | V | -14,9 | -108 | -1,7 |
| 210 | V | -16,3 | -117 | -3,5 |
| 240 | V+R | -16,6 | -119 | -3,9 |

Примечание. * Температура в период образования осадков рассчитана согласно [Dansgaard, 1964].

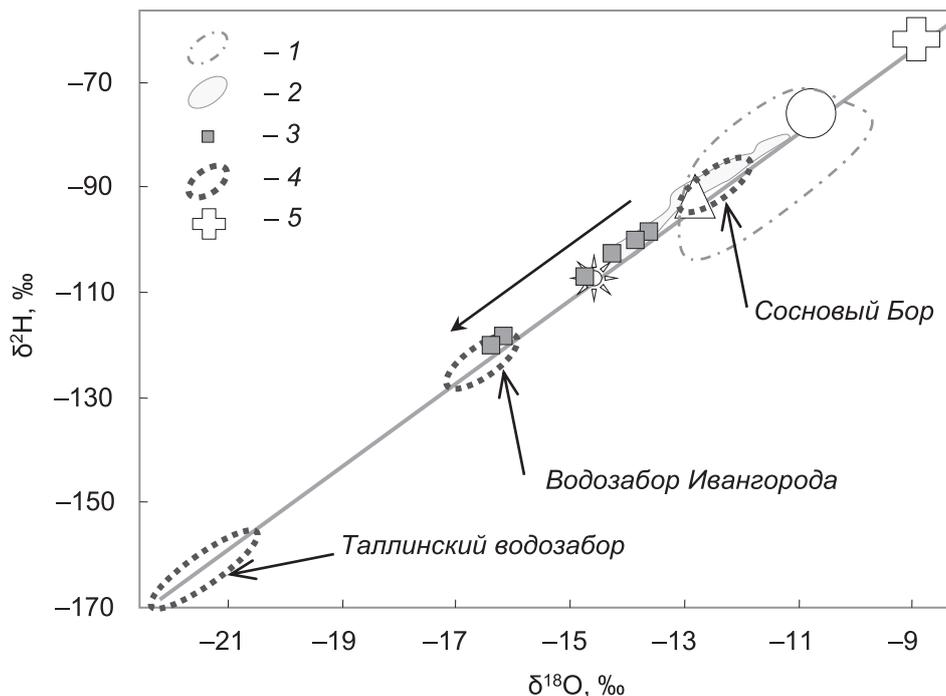


Рис. 5. Изотопный состав воды различных горизонтов в Ленинградской области и их сравнение с данными по Эстонии:

1 – четвертичные отложения, в том числе межморенные горизонты; 2 – ВВК и рифейский комплекс; 3 – изменение изотопного состава воды из скважины в пос. Луговое (табл. 4, стрелкой показан тренд изменения состава воды по мере углубления скважины); 4 – скважины на ломоносовский горизонт (местоположение указано в подписях на рисунке, данные для Таллинского водозабора взяты из [Raidla et al., 2009]); 5 – средние осадки теплого периода года (среднесуточная температура выше +5 °С); остальные обозначения на рис. 3

В настоящей работе приведены впервые полученные данные по изотопному составу воды и содержанию трития для водоносных горизонтов на Карельском перешейке. На базе этой информации можно сделать следующие выводы относительно условий формирования ресурсов и качества подземных вод.

В области выклинивания вендского водоносного комплекса возраст подземных вод, оцененный тритиевым методом, не превышает 100 лет. В области распространения верхнекотлинского водоупора, по-видимому, повсеместно обеспечивается хорошая защищенность от техногенного загрязнения с поверхности, на что указывают оценки возраста подземных вод радий/радоновым методом в интервале от 0,8 до 3,4 тыс. лет. Низкая проницаемость водоупора существенно снижает потенциал привлечения дополнительного питания за счет перетекания, даже при значительных понижениях напора в вендском водоносном комплексе.

В восточной и юго-восточной части Карельского перешейка, в относительной близости к области питания, по изотопному составу воды идентифицируется наличие реликтовых вод,

в формировании которых принимали участие воды древнего Балтийского ледникового озера. Современная связь поверхностных и подземных вод на этой площади затруднена, в том числе, по-видимому, отсутствует разгрузка подземных вод в Ладожское озеро. Значительный возраст воды в рифейском и вендском водоносных комплексах указывает на относительно низкие темпы водообмена и, следовательно, малый ресурсный потенциал на этих участках, так как эксплуатация подземных вод возможна практически только за счет упругих запасов.

Увеличение водоотбора на Карельском перешейке может привести к перемещению границы некондиционных соленых вод на север и северо-запад в сторону современного центра тяжести водоотбора, а также к подъему верхней границы соленых вод по разрезу.

Наблюдения за изотопным составом осадков, а также все измерения изотопного состава подземных вод выполнены при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 14-17-00766).

Литература

Баскова И. В., Воронюк Г. Ю. Отчет о выполнении работ по объекту «Гидрогеологическое доизучение масштаба 1:200 000 листа Р-35-XXXVI (Северо-Петербургская площадь)». ОАО «ПКГЭ», СПб, 2013. ФБУ «ТФГИ по СЗФО», № 28319.

Гудзенко В. В., Дубинчук В. Т. Изотопы радия и радон в природных водах. М.: Наука, 1987. 159 с.

Закон Ленинградской области от 6 сентября 2006 г. № 106-оз «О региональной целевой программе “Обеспечение населения Ленинградской области питьевой водой в 2007–2010 годах”» (Принят Законодательным собранием Ленинградской области 9 августа 2006 г.). URL: <http://www.garant.ru/hotlaw/peter/146574/> (дата обращения: 13.02.2012).

Игнатьев В. И., Рамушева О. В., Егорова И. В. и др. Аналитический обзор состояния недр территории Северо-Западного федерального округа Российской Федерации за период 2010–2014 гг. Вып. 2. СПб, 2015. 335 с. URL: <http://sevzapnedra.nw.ru/> (дата обращения: 17.02.2016).

Кармазинов Ф. В. Водоснабжение Санкт-Петербурга. СПб.: Новый журнал, 2003. 670 с.

Схема территориального планирования Всеволожского муниципального района Ленинградской области. URL: http://www.vsevreg.ru/city/grad/departament_of_architecture_and_urban_planning/

[scheme_of_territorial_planning/](#) (дата обращения: 20.10.2015).

Токарев И. В., Шварц А. А., Боровицкая Е. Ю. Экологические проблемы эксплуатации подземных вод Карельского перешейка // Вестник СПбГУ. Серия 7 «Геология и география». 2013. № 2. С. 21–31.

Ферронский В. И., Поляков В. А. Изотопия гидросферы Земли. М.: Научный мир, 2009. 632 с.

Широкова Е. К., Рошаль А. А. Отчет по оценке региональных эксплуатационных запасов подземных вод Ленинградского артезианского бассейна за 1972–1981 гг. ГП ПКГЭ, СПб., 1982. ФБУ «ТФГИ по СЗФО», № 24357.

Climate and climate-related issues for the safety assessment SR-Site. Svensk Kärnbränslehantering AB. Technical Report TR-10–49. Stockholm. 2010. 328 p.

Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation // Tellus. 1964. Vol. 16, no. 4. P. 436–463.

Kortelainen N. Isotopic composition of atmospheric precipitation and shallow groundwater in Oikiluoto: O-18, H-2 and H-3. Geological Survey of Finland and POSIVA OY. Oikiluoto-Eurajoki, Finland, 2009. 23 p.

Raidla V., Kirsimäe K., Vaikmäe R. et al. Geochemical evolution of groundwater in the Cambrian-Vendian aquifer system of the Baltic Basin // Chemical Geology. 2009. Vol. 258. P. 219–231.

Поступила в редакцию 04.03.2016

References

Baskova I. V., Voronjuk G. Ju. Otchjot o vypolnenii rabot po ob'ektu “Gidrogeologicheskoe doizuchenie masshtaba 1:200 000 lista R-35-XXXVI (Severo-Peterburgskaja ploshhad’).” ОАО “PKGJe” [Report on the implementation of the project “Hydrological survey of scale 1:200 000, sheet R-35-XXXVI (North St. Petersburg). JSC “St. Petersburg complex geological expedition”]. St. Petersburg, 2013. FBU “TFGI po SZFO”, № 28319.

Feronskij V. I., Poljakov V. A. Izotopija gidrosfery Zemli [Isotopes of the Earth hydrosphere]. Moscow: Nauchnyj mir, 2009. 632 p.

Gudzenko V. V., Dubinchuk V. T. Izotopy radija i radon v prirodnyh vodah [Radium and radon isotopes in natural waters]. Moscow: Nauka, 1987. 159 p.

Ignat'ev V. I., Ramusheva O. V., Egorova I. V., Dmitrieva I. A., Kolodina E. A. Analiticheskij obzor sostojanija neдр territorii Severo-Zapadnogo federal'nogo okruga Rossijskoj Federacii za period 2010–2014 gg. [Analytical review of the status of subsoils on the territory of the North-West Federal District of the Russian Federation for the years 2010–2014]. Iss. 2. St. Petersburg, 2015. 335 p. URL: <http://sevzapnedra.nw.ru/> (accessed: 17.02.2016).

Karmazinov F. V. Vodospabzhenie Sankt-Petersburga [Water supply of Saint Petersburg]. St. Petersburg: Novyj zhurnal, 2003. 670 p.

Shirokova E. K., Roshal' A. A. Otchet po ocenke regional'nyh jekspluatacionnyh zasposv podzemnyh vod Leningradskogo artezianskogo bassejna za 1972–1981 gg. GP PKGJe [The evaluation of the regional

usable groundwater resources of the Leningrad artesian basin for the years 1972–1981. SOE “St. Petersburg complex geological expedition”]. St. Petersburg, 1982. FBU “TFGI po SZFO”, № 24357.

Tokarev I. V., Shvarc A. A., Borovickaja E. Ju. Jekologicheskie problemy jekspluatatsii podzemnyh vod Karel'skogo pereshejka [Ecological problems of groundwater operation on Karelian Isthmus]. Vestnik SPbGU. Serija 7 “Geologija i geografija” [Vestnik of St. Petersburg State University. Ser. 7. Geology, Geography]. 2013. No. 2. P. 21–31.

Zakon Leningradskoj oblasti ot 6 Sent. 2006 g. N 106-oz “O regional'noj celevoj programme “Obespechenie naselenija Leningradskoj oblasti pit'evoj vodoj v 2007–2010 godah” (Prinjat Zakonodatel'nym sobranijem Leningradskoj oblasti 9 August 2006 g.) [Law of the Leningrad region, Sept. 6, 2006. N 106-oz “On the regional target program “ensuring the supply of drinking water to the population of the Leningrad Region in 2007–2010” (Adopted by the Legislative Assembly of the Leningrad Region on Aug. 9, 2006)]. URL: <http://www.garant.ru/hotlaw/peter/146574/> (accessed: 13.02.2012).

Climate and climate-related issues for the safety assessment SR-Site. Svensk Kärnbränslehantering AB. Technical Report TR-10–49. Stockholm. 2010. 328 p.

Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation. Tellus. 1964. Vol. 16, no. 4. P. 436–463.

Kortelainen N. Isotopic composition of atmospheric precipitation and shallow groundwater in Oikiluoto:

O-18, H-2 and H-3. Geological Survey of Finland and POSIVA OY. Olkiluoto-Eurajoki, Finland, 2009. 23 p.

Raidla V., Kirsimäe K., Vaikmäe R., Jõelet A., Karro E., Marandi A., Savitskaja L. Geochemical evolution of groundwater in the Cambrian-Vendian aquifer system

of the Baltic Basin. *Chemical Geology*. 2009. Vol. 258. P. 219–231.

Received March 04, 2016

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Воронюк Григорий Юрьевич

начальник партии региональных гидрогеологических работ
АО «Петербургская комплексная
геологическая экспедиция»
аспирант ФГБУ «ВСЕГЕИ»
ул. Одоевского, 24, корп. 1, Санкт-Петербург, Россия,
199155
эл. почта: grigory.voronuk@yandex.ru
тел.: +79215571480

Бородулина Галина Сергеевна

старший научный сотрудник, к. г.-м. н.
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Карелия, Россия,
185030
эл. почта: bor6805@yandex.ru
тел.: (8142) 576541

Крайнюкова Ирина Александровна

инженер, аспирант
Научный парк Санкт-Петербургского
государственного университета
ул. Ульяновская, 1, Петергоф, Санкт-Петербург,
Россия, 198504
эл. почта: i.a.avramenko@gmail.com
тел.: +79119932848

Токарев Игорь Владимирович

ведущий специалист, к. г.-м. н.
Научный парк Санкт-Петербургского
государственного университета
ул. Ульяновская, 1, Петергоф, Санкт-Петербург,
Россия, 198504
эл. почта: tokarevigor@gmail.com
тел.: +79215721238

CONTRIBUTORS:

Voroniuk, Grigory

JSC "Petersburg Complex Geological Expedition"
24–1 Odoevsky St., 199155 St. Petersburg, Russia
e-mail: grigory.voronuk@yandex.ru
tel.: +79215571480

Borodulina, Galina

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: bor6805@yandex.ru
tel.: (8142) 576541

Krainyukova, Irina

St. Petersburg State University Research Park
1 Ul'yanovskaya St., 198504 Petergof, St. Petersburg, Russia
e-mail: i.a.avramenko@gmail.com
tel.: +79119932848

Tokarev, Igor

St. Petersburg State University Research Park
1 Ul'yanovskaya St., 198504 Petergof, St. Petersburg, Russia
e-mail: tokarevigor@gmail.com
tel.: +79215721238

УДК 556.555.8:504.4.054

АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ФОРМ МЕТАЛЛОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ОЗЕР ПРИРОДНЫХ И УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН

**В. С. Валиев, Д. В. Иванов, И. И. Зиганшин, Д. Е. Шамаев,
В. В. Маланин, А. А. Марасов**

*Институт проблем экологии и недропользования
Академии наук Республики Татарстан*

Выполнена сравнительная оценка уровней содержания и выявлены закономерности распределения валовых и подвижных форм металлов (Cd, Pb, Co, Cu, Ni, Zn, Cr, Mn, Fe) в составе донных отложений озер природных (Волжско-Камский заповедник) и урбанизированных (г. Казань) территорий Республики Татарстан. Показаны изменения абсолютного содержания металлов в донных отложениях городских водоемов, а также их соотношения, нарушающего правило Оддо – Гаркинса, обусловленные формами поступления элементов из техногенных источников. В водоемах природных и урбанизированных территорий факторами, определяющими подвижность катионогенных металлов, выступают реакция среды и гранулометрический состав седиментов. Показано, что активным слоем донных отложений, в котором протекают процессы биогеохимической трансформации природных и техногенных соединений металлов, является поверхностный слой мощностью до 50 см.

Ключевые слова: донные отложения; озера; металлы; правило Оддо – Гаркинса; Республика Татарстан.

**V. S. Valiev, D. V. Ivanov, I. I. Ziganshin, D. E. Shamaev, V. V. Malanin,
A. A. Marasov. METALS FORMS DISTRIBUTION IN LAKES SEDIMENTS
OF NATURAL AND URBAN AREAS OF THE REPUBLIC OF TATARSTAN**

The paper contains the comparative assessment of content levels and the revealed patterns of total and mobile forms of metals (Cd, Pb, Co, Cu, Ni, Zn, Cr, Mn, Fe) distribution in the bottom sediments of natural (Volga-Kama Nature Reserve) and urbanized (Kazan) territories of the Republic of Tatarstan. The changes in absolute metals content in sediments of urban lakes, as well as their ratio, breaking the Oddo-Harkins rule, caused by the forms of their release to the aquatic environment from technogenic sources are shown. Environment reaction and particle size composition of sediments are the factors determining the mobility of cationogenic metals in water bodies of natural and urbanized areas. It was found that the active layer of sediments, in which processes of biogeochemical transformation of natural and technogenic metals compounds occur, is a surface layer with capacity up to 50 cm.

Key words: sediments; lakes; metals; Oddo-Harkins rule; Republic of Tatarstan.

Введение

Качественная и количественная физико-химическая оценка донных отложений водоемов и водотоков не только является важнейшей характеристикой их современного экологического состояния, но и четко фиксирует процессы массопереноса веществ, происходившие в прошлом, а также незаменима при построении прогностических моделей будущего состояния водного объекта. В донных отложениях сосредоточен основной пул органических и неорганических веществ, поступающих в водоем, структурированный в виде слоев, образованных в результате седиментации взвешенного и растворенного материала.

Важнейшей качественной и количественной характеристикой состава донных отложений является содержание в них металлов, которые, попав в водоем, неизменно сохраняются в нем, вовлекаясь в круговорот веществ и постепенно накапливаясь в донных отложениях. В зависимости от источника и формы поступления того или иного металла, типа отложений, морфометрических и гидродинамических параметров водоема и целого ряда других факторов возникают геохимические неоднородности в распределении металлов в донных осадках. Весьма интересной и пока мало исследованной характеристикой неоднородности распределения различных металлов в донных отложениях является анализ соотношений элементов, расположенных в таблице Д. И. Менделеева на соседних нечетных и четных порядковых номерах [Никаноров, 2009; Игнатова, 2010]. Еще в 1914 г. итальянский физик Дж. Оддо обратил внимание на то, что в земной коре преобладают элементы с четными порядковыми номерами и четной атомной массой. Более подробно это явление было изучено американским исследователем У. Гаркинсом. В результате оно получило название правила Оддо – Гаркинса [Перельман, Касимов, 1999]. Правило гласит: из двух соседних элементов таблицы Д. И. Менделеева содержание в земной коре четного элемента обычно больше. В дальнейшем А. П. Виноградов [1935] указал на особенности распределения элементов в живом веществе, а В. И. Вернадский [1965] обобщил накопленные данные, отметив, что, помимо закона Оддо – Гаркинса, закона распространенности (феномена неодинаковой устойчивости четно-нечетных ядер) четно-нечетных химических элементов существует закон, качественно отличный от первого – закон неодинакового их перемещения.

Особая роль донных отложений состоит в том, что они являются естественным слоем

межфазового перехода химических соединений, формируя транслокационные условия перехода элементов из одной среды в другую, что, с одной стороны, обеспечивает процессы самоочищения воды, а с другой – может способствовать ее вторичному загрязнению. Важными условиями межфазового перехода являются: реакция среды; гранулометрический состав отложений (песчаные, илистые, глинистые и т. д.); глубина водоема, определяющая протекание фотохимических процессов; температурный режим; давление; окислительно-восстановительные условия на границе фаз, а также мощность «активного» слоя донных отложений, обуславливающая физико-химические процессы, происходящие в толще осадков. На урбанизированных территориях важным критерием, определяющим «подвижность» металлов в донных отложениях, становится источник и химическая форма их поступления в водоем.

В связи с этим целью нашего исследования явилась оценка уровня содержания металлов (Cd, Pb, Co, Cu, Ni, Zn, Cr, Mn, Fe) и их соотношения в отдельных слоях донных отложений, установление общих закономерностей и особенностей их распределения в озерах фоновых (Волжско-Камский государственный природный биосферный заповедник (ВКГПБЗ)) и урбанизированных (г. Казань) территорий Республики Татарстан.

Рабочей гипотезой исследования явилось предположение об изменении не только абсолютного содержания металлов в донных отложениях городских водоемов, но и их соотношения, нарушающего правило глобального рассеяния, а также об увеличении в этих условиях доли подвижных форм элементов, обусловленном особенностями форм их поступления в водную среду из техногенных источников.

Материал и методы исследования

В рамках исследования было изучено 8 озер, расположенных на территории ВКГПБЗ, а также 5 крупных и более 150 разнотипных мелких водоемов в черте г. Казани.

Отбор донных отложений проводился в соответствии с ГОСТ 17.1.5.01-80 и РД 52.24.609-99. Отбор проб поверхностных слоев отложений осуществляли лотом с хrapцом и дночерпателем ДЧ-0.025. Для отбора стратифицированных колонок донных отложений использовали трубки ГОИН ТГ-1.0 и ТГ-1.5. Отбор колонок производился в наиболее глубокой части водоема, где донные отложения обычно достигают своей максимальной мощности.

Таблица 1. Изменение показателей содержания металлов в донных отложениях озер по мере убывания антропогенной нагрузки

| | Старица р. Казанки | Нижний Кабан | Средний Кабан | Верхний Кабан | Озера ВКГПБЗ (фон) |
|------------------------|-----------------------|--------------|---------------|---------------|-----------------------|
| Валовые формы, мг/кг | | | | | |
| Cd | 50,2 ± 5,9 | 0,72 ± 0,24 | 0,93 ± 0,10 | 0,14 ± 0,02 | 0,25 ± 0,02 |
| Pb | 126,3 ± 5,8 | 29,1 ± 1,5 | 19,7 ± 1,0 | 20,2 ± 1,2 | 11,2 ± 0,6 |
| Co | 5,4 ± 0,5 | 8,5 ± 0,5 | 6,8 ± 0,4 | 10,7 ± 0,6 | 13,3 ± 0,6 |
| Cu | 776,5 ± 85,9 | 26,7 ± 2,2 | 40,9 ± 3,1 | 23,8 ± 1,7 | 17,9 ± 1,0 |
| Ni | 322,2 ± 36,5 | 22,2 ± 2,6 | 30,1 ± 1,3 | 36,6 ± 2,4* | 36,0 ± 1,6 |
| Zn | 597,0 ± 34,0 | 104,5 ± 12,0 | 88,0 ± 7,6 | 88,7 ± 7,3 | 62,8 ± 2,8 |
| Cr | 1956,2 ± 160,2 | 29,9 ± 2,8* | 24,8 ± 1,5 | 33,1 ± 2,0* | 33,8 ± 1,3 |
| Mn | 272,7 ± 18,4 | 408,2 ± 65,4 | 660,7 ± 26,7 | 750,6 ± 57,8 | 472,8 ± 27,6 |
| Fe | 13370 ± 943 | 10744 ± 736 | 16482 ± 889 | 21798 ± 1518 | 22528 ± 1030 |
| Подвижные формы, мг/кг | | | | | |
| Cd | 15,2 ± 1,5 | 0,72 ± 0,27 | 0,68 ± 0,10 | 0,11 ± 0,01* | 0,12 ± 0,02 |
| Pb | 7,0 ± 0,3 | 9,8 ± 0,7 | 6,7 ± 0,3 | 4,9 ± 0,3 | 1,1 ± 0,1 |
| Co | 0,63 ± 0,05 | 0,77 ± 0,09 | 0,68 ± 0,05 | 0,48 ± 0,04* | 0,43 ± 0,04 |
| Cu | 73,6 ± 6,4 | 3,7 ± 0,4 | 4,4 ± 0,7 | 1,2 ± 0,1* | 1,2 ± 0,1 |
| Ni | 59,1 ± 5,1 | 4,8 ± 0,6 | 3,6 ± 0,4 | 1,6 ± 0,1* | 1,5 ± 0,1 |
| Zn | 66,5 ± 1,0 | 23,1 ± 2,6 | 15,9 ± 1,9 | 8,1 ± 1,2 | 4,1 ± 0,6 |
| Cr | 25,60 ± 1,18 | 1,16 ± 0,14 | 1,47 ± 0,25 | 0,51 ± 0,04* | 0,55 ± 0,08 |
| Mn | 62,2 ± 5,4 | 254,8 ± 24,1 | 294,9 ± 19,8 | 315,4 ± 26,1 | 177,3 ± 7,4 |
| Fe | 34,8 ± 6,7 | 99,2 ± 12,4 | 140,3 ± 12,3 | 132,9 ± 6,7 | 206,5 ± 5,6 |
| % подвижных форм | | | | | |
| Cd | 33,2 ± 1,5 | 90,7 ± 3,4 | 80,1 ± 2,8 | 92,0 ± 2,5 | 57,7 ± 3,8 |
| Pb | 5,9 ± 0,3 | 33,2 ± 1,7 | 43,3 ± 2,6 | 29,4 ± 2,0 | 13,8 ± 1,8 |
| Co | 14,8 ± 1,9 | 9,4 ± 1,2 | 9,9 ± 0,9 | 5,4 ± 0,6 | 3,7 ± 0,4 |
| Cu | 10,1 ± 0,4 | 13,5 ± 1,3 | 10,9 ± 1,0 | 6,8 ± 0,6 | 10,0 ± 1,0 |
| Ni | 21,2 ± 1,0 | 41,0 ± 7,4 | 11,2 ± 1,4 | 5,3 ± 0,5* | 5,0 ± 0,4 |
| Zn | 12,1 ± 0,6 | 23,6 ± 3,3 | 19,7 ± 1,7 | 10,9 ± 1,2 | 7,4 ± 1,0 |
| Cr | 1,5 ± 0,1 | 3,8 ± 0,4 | 6,0 ± 1,6 | 1,9 ± 0,2* | 1,4 ± 0,1 |
| Mn | 22,4 ± 0,8 | 71,9 ± 4,4 | 45,8 ± 2,8* | 50,3 ± 2,7* | 48,8 ± 2,4 |
| Fe | 0,25 ± 0,03 | 0,97 ± 0,13 | 0,69 ± 0,06 | 0,8 ± 0,07 | 1,05 ± 0,05 |

Примечание. *Различие недостоверно ($p > 0,05$) при сравнении с фоновым участком.

Координаты точек отбора проб фиксировали GPS-навигатором Garmin CSx 76.

В общей сложности отобрано и проанализировано 510 образцов донных отложений, в том числе 15 кернов различной мощности. В пробах донных отложений определяли гранулометрический состав [ГОСТ 12536-2014], содержание органического вещества по потерям при прокаливании (ППП) [ГОСТ 26213-91], реакцию среды [ГОСТ 26423-85].

Естественные кислотно-основные условия профундальной части ложа водоемов имеют преимущественно кислый и слабокислый (pH 4,0–6,5) характер. Именно в условиях кислой среды донных осадков обычно отмечается рост геохимической подвижности металлов и биогенных элементов. В связи с этим формы соединений металлов, способные к быстрому межфазовому переходу в условиях кислой

среды, были условно обозначены нами как «подвижные». Эти формы экстрагировались из образцов ацетатно-аммонийным буферным раствором с pH = 4,8 [ПНД Ф 16.1:2:2.2:2.3.78-2013]. Общий пул элементов, извлекаемых из образцов донных отложений 5н HNO₃ [РД 52.18.191-89], в нашем исследовании обозначен как «валовые формы». Концентрации металлов (Cd, Pb, Co, Cu, Ni, Zn, Cr, Mn, Fe) в растворе определяли методом пламенной атомно-абсорбционной спектроскопии на приборе Analyst 400 (Perkin Elmer).

Статистическую обработку данных проводили с помощью пакета статистических программ Statistica 6.0 (StatSoft Inc.). Для оценки различий между двумя независимыми выборками использовался U-критерий Манна – Уитни, для множественных сравнений – критерий Ньюмена – Кейлса, корреляционные взаимосвязи

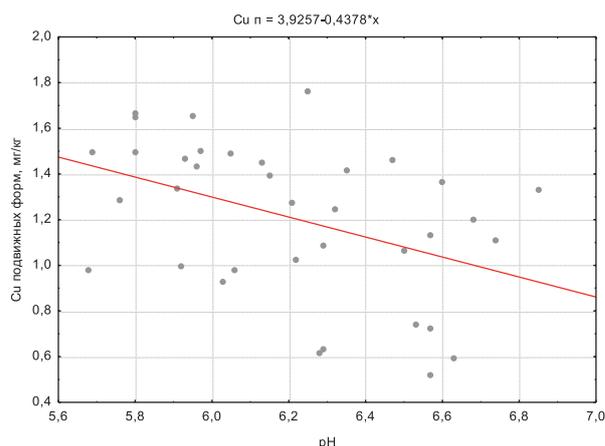
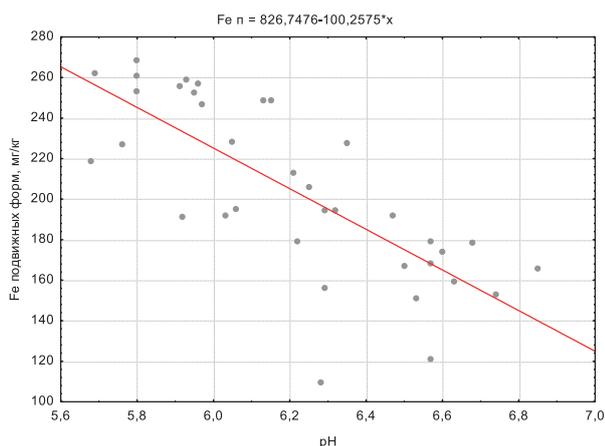


Рис. 1. Зависимость содержания подвижных форм Fe и Cu в донных отложениях водоемов ВКГПБЗ от pH среды

оценивали коэффициентом корреляции Пирсона. Из специальных методов были применены дискриминантный и регрессионный анализы с пошаговым исключением признаков и расчетом дискриминантных функций.

Результаты и их обсуждение

При анализе показателей состава донных отложений исследуемых водных объектов выделяется четкая изменчивость этих показателей, резко отличающая фоновые водоемы от водоемов, расположенных на урбанизированной территории. Особенно наглядно выявленные закономерности проявляются при сравнительной оценке различных озерных систем. Так, уже при первом приближении наблюдается выраженный тренд многих показателей в ряду: озера ВКГПБЗ – оз. Верхний Кабан – оз. Средний Кабан – оз. Нижний Кабан – старица р. Казанки. В связи с этим была проведена статистическая оценка и сравнение аналитических показателей, локализованных в пределах указанных экосистем (табл. 1). Участки исследования расположены по степени убывания антропогенного воздействия и улучшения экологического состояния. Анализируемые абсолютные и относительные показатели содержания валовых и подвижных форм металлов наглядно демонстрируют общую направленность фиксируемых изменений. По мере снижения антропогенной нагрузки отмечается уменьшение содержания в донных отложениях валовых форм свинца и цинка, и наоборот, увеличение кобальта; общее содержание подвижных форм всех металлов, кроме железа, убывает, и, соответственно, убывает и доля их подвижных форм.

Необходимо отметить, что на фоновом участке реакция среды донных отложений

профундали имеет слабокислый характер ($pH = 6,17 \pm 0,08$), тогда как в водоемах г. Казани – слабощелочной ($pH = 7,41 \pm 0,05$; различия статистически значимы, $p < 0,001$). При этом в донных отложениях водоемов заповедника отмечается статистически значимая обратная корреляционная связь между значениями pH и содержанием подвижных форм металлов (рис. 1). Подобная тенденция снижения содержания подвижных форм, а также их долей с увеличением значений pH характерна для всех исследуемых металлов, за исключением Mn, содержание подвижных форм которого возрастает ($r = 0,36$; $p = 0,028$).

В водоемах урбанизированных территорий наблюдается несколько иная картина: здесь отмечается небольшое, но четко фиксируемое увеличение с ростом pH содержания подвижных форм многих металлов (Cd, Pb, Cu, Cr, Fe), а особенно их относительных долей (статистически значимые коэффициенты корреляций $r = 0,15-0,25$). Учитывая, что в водоемах г. Казани донные отложения имеют слабощелочную среду, высокая доля в них подвижных форм металлов может быть обусловлена большим их «выходом» при экстракции кислым ацетатно-аммонийным буфером. Обмен металлами между донными отложениями и придонным слоем воды фоновых водоемов также обусловлен низкой величиной pH озерных осадков. Именно за счет возрастания подвижных форм марганца наблюдается увеличение соотношения Mn/Fe ($r = 0,5$; $p = 0,001$) в условиях щелочной среды отложений городских водоемов.

Показатели содержания металлов в поверхностных (0–20 см) донных отложениях водоемов фоновой или урбанизированной территорий представлены в таблице 2.

В результате обработки полученных данных удалось выделить показатели,

Таблица 2. Сравнение показателей содержания металлов в поверхностном слое донных отложений фоновых и урбанизированных водоемов

| Показатель | Водоемы г. Казани | | Озера ВКГПБЗ | |
|------------------------|-------------------|--------------|----------------|---------------|
| | М | m | М | m |
| pH | 7,4 | 0,1 | 6,1 | 0,2 |
| ППП, % | 11,6 | 0,9 | 11,6 | 1,7 |
| Валовые формы, мг/кг | | | | |
| Cd | 1,80 | 0,45 | 0,27 | 0,02 |
| Pb | 22,6 | 1,7 | 10,8 | 1,0 |
| Co | 13,8 | 0,9 | 13,7 | 1,1 |
| Cu | 55,2 | 11,0 | 17,9 | 1,8 |
| Ni | 56,4 | 4,72 | 34,9 | 2,7 |
| Zn | 998,7 | 421,7 | 63,3 | 4,5 |
| Cr | 59,2 | 18,0 | 33,8 | 2,2 |
| Mn | 385,0 | 17,4 | 478,0 | 52,8 |
| Fe | 15854,8 | 661,1 | 23297,0 | 1898,1 |
| Mn/Fe | 0,04 | 0,00 | 0,02 | 0,00 |
| Co/Ni | 0,30 | 0,01 | 0,42 | 0,03 |
| Cu/Zn | 0,49 | 0,04 | 0,27 | 0,02 |
| Подвижные формы, мг/кг | | | | |
| Cd | 0,72 | 0,20 | 0,11 | 0,02 |
| Pb | 6,5 | 1,0 | 1,3 | 0,2 |
| Co | 0,53 | 0,03 | 0,52 | 0,05 |
| Cu | 7,7 | 2,5 | 1,3 | 0,1 |
| Ni | 2,9 | 0,6 | 1,8 | 0,2 |
| Zn | 21,0 | 2,1 | 6,7 | 1,2 |
| Cr | 1,27 | 0,24 | 0,68 | 0,19 |
| Mn | 119,0 | 7,9 | 157,4 | 13,8 |
| Fe | 95,8 | 4,92 | 215,3 | 6,7 |
| Mn/Fe | 1,88 | 0,09 | 0,71 | 0,05 |
| Co/Ni | 0,58 | 0,06 | 0,30 | 0,03 |
| Cu/Zn | 0,40 | 0,04 | 0,36 | 0,06 |
| % подвижных форм | | | | |
| Cd | 48,7 | 2,1 | 44,5 | 5,4 |
| Pb | 32,1 | 1,4 | 19,1 | 4,0 |
| Co | 6,6 | 0,5 | 5,1 | 0,8 |
| Cu | 9,5 | 0,7 | 10,8 | 1,8 |
| Ni | 5,6 | 0,7 | 6,3 | 0,7 |
| Zn | 19,6 | 1,0 | 11,5 | 2,0 |
| Cr | 5,9 | 0,4 | 1,6 | 0,3 |
| Mn | 33,5 | 1,5 | 49,1 | 2,9 |
| Fe | 0,9 | 0,1 | 1,15 | 0,1 |

Примечание. Жирным шрифтом выделены статистически значимые различия, $p < 0,05$. М – среднее арифметическое, m – ошибка среднего.

демонстрирующие статистически значимые различия, и на основании дискриминантного анализа рассчитать классифицирующие функции соответствия, относительные β -коэффициенты которых указывают на направленность воздействия и вес той или иной переменной в заданной их совокупности. Метод пошагового исключения переменных (исключение

из модели при $F < 35$), а также проверка на мультиколлинеарность позволили оставить в модели только наиболее значимые переменные. При моделировании с разделением на отдельные участки наиболее значимым оказалось содержание в донных отложениях подвижных форм Cr и валовых форм Mn и Ni. Коэффициенты разделительных функций на разных участках выглядят следующим образом (табл. 3).

При обобщении всех закономерностей в модель, разделяющую массив наблюдений на две категории: «фоновый участок» и «водоемы Казани», остается единственная переменная – содержание подвижных форм Fe (табл. 4). Таким образом, динамика изменчивости подвижных форм железа в донных отложениях является важнейшим критерием качественного состояния водоема в целом, отражая совокупность тенденций и закономерностей, проявляющихся в условиях антропогенного воздействия. Снижение подвижных форм Fe, рост отношения подвижных форм Mn и Fe, рост pH в щелочную сторону наблюдаются в условиях возрастания антропогенной нагрузки на водоемы и являются важными признаками геохимической трансформации донных отложений и водного объекта в целом.

Ведущим фактором формирования геохимического фона металлов в донных отложениях водоемов и накопления в них токсичных металлов в условиях техногенной нагрузки на водоемы выступает гранулометрический состав седиментов (ГМС) [Muller et al., 2001; Joshua, Oyebanjo, 2010].

При оценке содержания металлов в донных отложениях профундали фоновых озер ВКГПБЗ, отличающихся характером ГМС, отмечены две важные закономерности: 1) образцы с высокой долей крупных частиц (1–0,05 мм) отличаются ростом доли подвижных форм типичных эссенциальных металлов (Fe, Co, Zn), что связано, по всей видимости, с наличием в этой фракции органического детрита; 2) подвижность Mn, Cd и особенно Cr, напротив, возрастает в образцах с высокой долей пелитовых частиц (<0,01 мм) и может быть обусловлена сорбцией этих элементов тонкодисперсной составляющей осадков, а доля подвижных форм Pb и Ni постепенно убывает с возрастанием доли мелких фракций (табл. 5). Указанные закономерности демонстрируют устойчивость в отношении донных отложений всех водоемов фонового участка, что выражается в наличии статистически значимых корреляционных взаимосвязей между весовой долей той или иной гранулометрической фракции и относительным количеством подвижных форм металлов.

Таблица 3. Коэффициенты классифицирующих функций дискриминантного анализа (F = 152,4; p = 0,0001)

| Параметры | ВКГПБЗ (фон) | Старица р. Казанки | Нижний Кабан | Средний Кабан | Верхний Кабан |
|--------------------------|--------------|--------------------|--------------|---------------|---------------|
| Подвижные формы Cr | 0,00739 | 0,00458 | -0,0009 | 0,00646 | 0,01054 |
| Валовые формы Mn | -0,00170 | 0,01618 | -0,1456 | -0,00862 | -0,01772 |
| Валовые формы Ni | 0,11826 | -0,28328 | 7,7548 | 0,30043 | 0,56113 |
| Свободный член уравнения | -3,67170 | -1,81736 | -78,7505 | -4,18817 | -5,57119 |

Таблица 4. Коэффициенты классифицирующих функций дискриминантного анализа для исследованных участков (F = 82,6; p < 0,0001)

| Параметры | ВКГПБЗ (фон) | Водоёмы г. Казани |
|--------------------------|--------------|-------------------|
| Подвижные формы Fe | 0,03681 | 0,02149 |
| Свободный член уравнения | -5,05162 | -1,24778 |

Таблица 5. Коэффициенты корреляции между долей подвижных форм металлов и содержанием гранулометрических фракций в донных отложениях водоемов

| | Размер частиц донных отложений, мм | | | | | |
|-------------------|------------------------------------|-----------|-----------|------------|-------------|--------|
| | 1-0,25 | 0,25-0,05 | 0,05-0,01 | 0,01-0,005 | 0,005-0,001 | <0,001 |
| Озера ВКГПБЗ | | | | | | |
| Cd | -0,06 | -0,22 | -0,02 | -0,12 | 0,16 | 0,40* |
| Pb | 0,43 | 0,27 | 0,11 | -0,18 | -0,34 | -0,40* |
| Co | 0,72* | 0,51* | -0,34 | -0,18 | -0,30 | -0,43* |
| Cu | -0,25 | 0,29 | 0,39* | -0,54* | -0,59* | -0,25 |
| Ni | 0,38 | 0,47* | -0,07 | -0,29 | -0,49* | -0,39* |
| Zn | 0,60* | 0,51* | -0,10 | -0,30 | -0,46* | -0,50* |
| Cr | -0,46 | -0,28 | -0,43* | 0,48* | 0,61* | 0,41* |
| Mn | 0,53 | -0,31 | 0,05 | 0,44* | 0,48* | -0,05 |
| Fe | 0,81* | 0,73* | -0,13 | -0,37 | -0,66* | -0,69* |
| Водоёмы г. Казани | | | | | | |
| Cd | -0,19* | -0,44* | 0,24* | 0,44* | 0,45* | 0,45* |
| Pb | 0,20* | -0,08 | -0,07 | -0,07 | -0,07 | -0,09 |
| Co | 0,11 | -0,09 | 0,01 | 0,01 | -0,00 | -0,06 |
| Cu | 0,12* | 0,07 | -0,07 | -0,12* | -0,12* | -0,09 |
| Ni | -0,19* | -0,18* | 0,26* | 0,22* | 0,18* | 0,15* |
| Zn | 0,15* | -0,02 | -0,01 | -0,08 | -0,07 | -0,18* |
| Cr | 0,32* | 0,05 | -0,16* | -0,16* | -0,19* | -0,28* |
| Mn | -0,27* | -0,38* | 0,38* | 0,39* | 0,42* | 0,29* |
| Fe | 0,32* | 0,08 | -0,25* | -0,24* | -0,21* | -0,20* |

Примечание. *Уровень значимости p < 0,05.

В донных отложениях городских водоемов, подверженных антропогенному воздействию, картина распределения подвижности металлов в зависимости от ГМС осадков совершенно иная (табл. 5). Здесь наблюдается два типа изменчивости: возрастание роли мелких фракций в распределении подвижных форм Cd, Mn и Ni, а также крупных фракций в распределении Cr, Pb, Zn, Cu, Fe. Таким образом, при антропогенной нагрузке рост подвижности большинства металлов напрямую связан с увеличением доли крупных фракций в составе отложений.

В наибольшей степени установленные различия в корреляционных связях выражены в распределении хрома.

В донных отложениях фоновых водоемов ВКГПБЗ правило Оддо – Гаркинса выполняется для всех отношений как валовых, так и подвижных форм металлов. Нарушение правила отмечается лишь для некоторых отношений подвижных форм, в условиях роста доли подвижных форм нечетных элементов, на что в свое время указывал В. И. Вернадский [1965], формируя закон неодинакового их перемещения. В результате

Таблица 6. Соотношение содержания ряда металлов в донных отложениях фоновых и городских озер

| Соотношение металлов | Озера ВКГПБЗ | Водоёмы г. Казани |
|-----------------------|----------------|-------------------|
| Mn/Fe валовые формы | 0,022 ± 0,001 | 0,036 ± 0,003 |
| Co/Ni валовые формы | 0,389 ± 0,017 | 0,346 ± 0,024 |
| Cu/Zn валовые формы | 0,281 ± 0,009 | 0,513 ± 0,024* |
| Mn/Fe подвижные формы | 0,888 ± 0,031 | 2,837 ± 0,49* |
| Co/Ni подвижные формы | 0,289 ± 0,019 | 0,468 ± 0,036* |
| Cu/Zn подвижные формы | 0,517 ± 0,024* | 0,409 ± 0,019 |

Примечание. *Значение статистически достоверно выше, $p < 0,05$.

анализа полученных отношений подвижных форм нечетных и четных элементов в периодической системе Д. И. Менделеева выделены типичные варианты нарушения или тенденции к изменению соотношения Оддо – Гаркинса в донных отложениях водоемов урбанизированных территорий:

1) правило Оддо – Гаркинса нарушается: в условиях антропогенного воздействия отмечается инверсия соотношения «нечетный элемент / четный элемент». Примером подобного варианта является изменчивость соотношения концентраций в донных отложениях подвижных форм марганца и железа (рис. 2, а);

2) правило Оддо – Гаркинса сохраняется, но происходит рост соотношения «нечетный элемент / четный элемент». Характерным примером является соотношение подвижных форм кобальта и никеля (рис. 2, б);

3) правило Оддо – Гаркинса сохраняется, но происходит снижение соотношения «нечетный элемент / четный элемент» (рис. 2, в).

Распределение соотношений стоящих рядом металлов с четными и нечетными номерами периодической таблицы Д. И. Менделеева в донных отложениях фоновых и городских водоемов представлено в таблице 6.

Распределение металлов в ядрах донных отложений имеет несколько ярко выраженных закономерностей. Так, в фоновых водоемах отношение Mn/Fe для подвижных форм постепенно возрастает с глубиной и проявляет инверсию начиная с глубин ниже 50 см (рис. 3). Для отношения Mn/Fe валовых форм также характерен пик значений именно на глубине порядка 50 см, однако затем отмечается четкое их снижение, носящее линейный характер.

Если рассмотреть соотношение металлов в донных отложениях водоемов городской черты (рис. 3), то здесь отмечаются те же

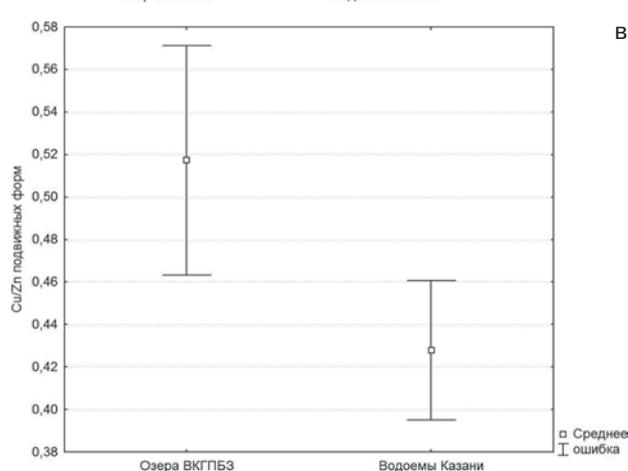
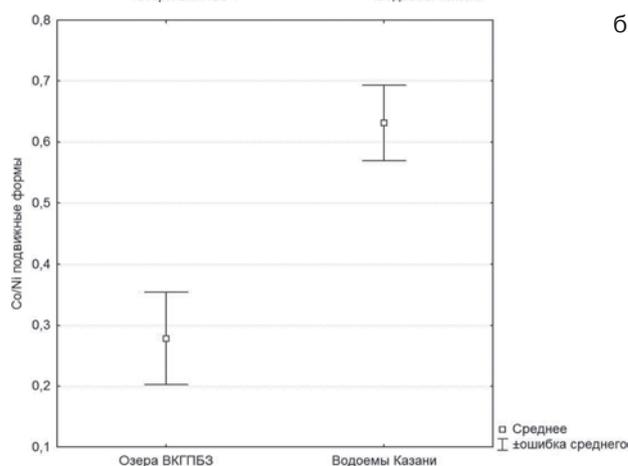
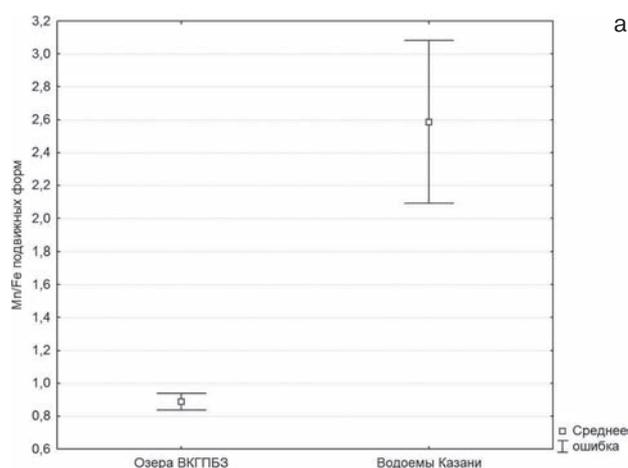
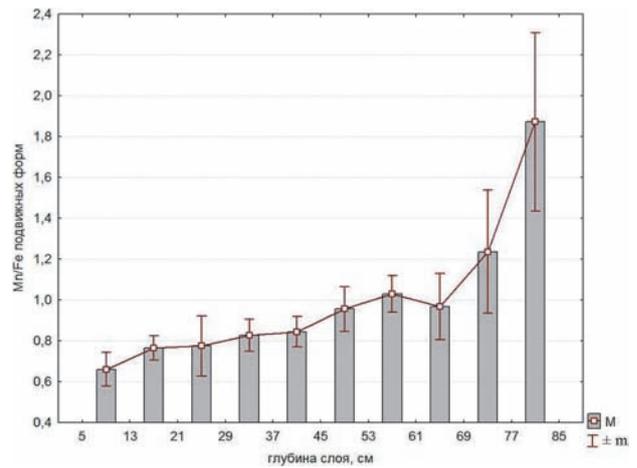
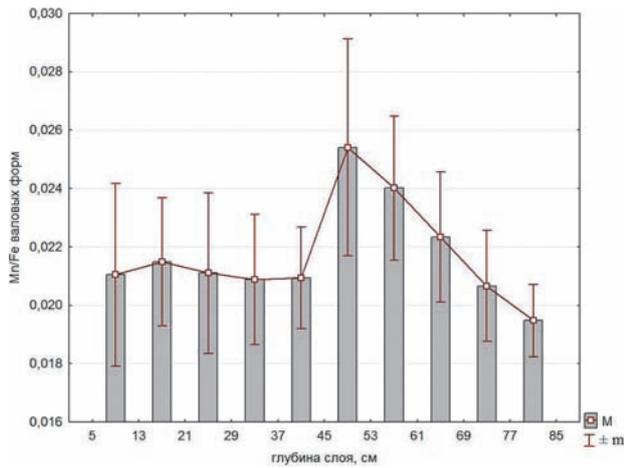


Рис. 2. Соотношение подвижных форм металлов в донных отложениях:

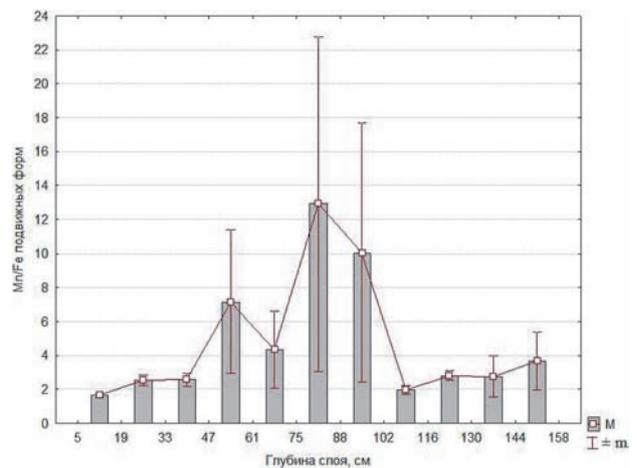
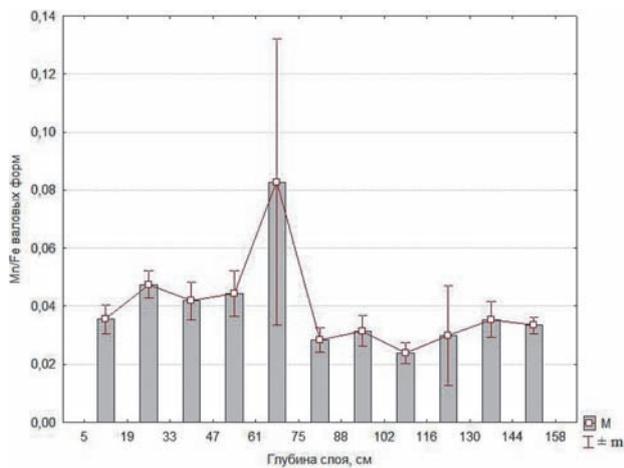
а) Mn/Fe, б) Co/Ni, в) Cu/Zn

закономерности, а именно резкий скачок отношения валовых форм Mn/Fe в слоях на глубине порядка 50–60 см с последующим падением. При этом соотношение подвижных форм марганца и железа в водоемах Казани остается инверсированным ($Mn/Fe > 1$) во всех слоях донных отложений.

Увеличение доли органического вещества приводит к резкому росту содержания



Озера ВКГПБЗ



Водоемы г. Казани

Рис. 3. Изменение отношения валовых и подвижных форм Mn и Fe по профилю донных отложений

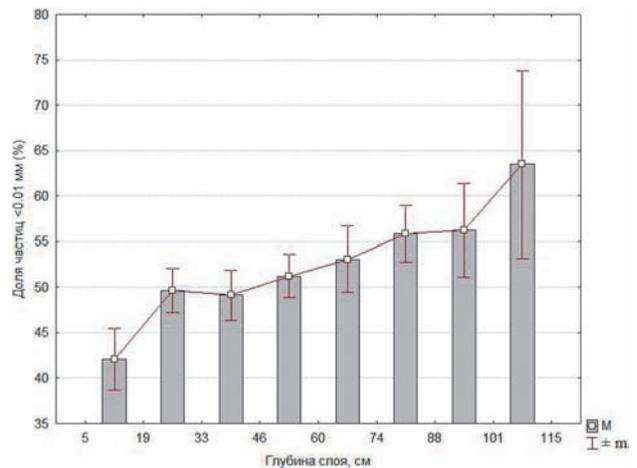
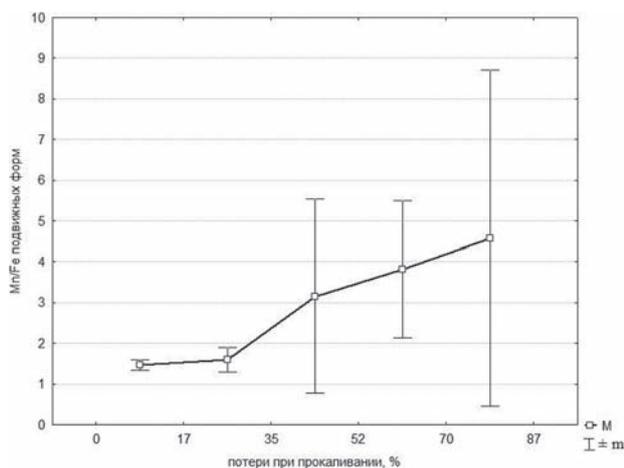


Рис. 4. Изменение отношения подвижных форм Mn и Fe в донных отложениях в зависимости от величины ППП

Рис. 5. Изменение содержания частиц <0,01 мм в донных отложениях с глубиной

в донных отложениях подвижных форм марганца, изменяя отношение Mn/Fe (рис. 4). Выявленная закономерность описывается уравнением регрессии:

$Mn/Fe \text{ п. ф.} = 1,06 \times \text{ППП} - 6,33$ ($r = 0,55$; $R^2 = 0,31$; $F = 48,5$; $p = 0,041$).

Неоднородность послойного распределения ГМС донных отложений как фоновых, так

и городских водоемов имеет закономерный характер, обусловленный годовыми циклами седиментации частиц, и проявляется в тенденции к возрастанию доли тонкодисперсных частиц с глубиной (рис. 5). Для верхних слоев озерных отложений характерна высокая доля песчаных и алевритовых фракций (0,05–1 мм). Их относительная аккумуляция может быть связана с тенденцией увеличения за последние 50 лет среднегодового количества осадков на территории Среднего Поволжья [Переведенцев и др., 2010] и с возрастанием на этом фоне доли крупноразмерных частиц почв и грунтов, перемещаемых временными водными потоками с водосборов озер.

Учитывая, что подвижность металлов демонстрирует четкую взаимосвязь с размером частиц, следовало ожидать вполне определенных закономерностей распределения доли их подвижных форм по профилю отложений. Установлено, что подвижность металлов максимальна в поверхностном слое донных отложений всей исследованной совокупности фоновых и урбанизированных водоемов и постепенно понижается с глубиной. Исключение составляют техногенные илы старицы р. Казанки. Коэффициенты корреляции доли подвижных форм с глубиной слоя для разных металлов колеблются от –0,28 по свинцу ($r = 0,043$) до –0,50 по цинку ($r = 0,001$). Важно отметить, что здесь также выделяется «переломный» слой на глубине 50 см, ниже которого снижение доли подвижных форм металлов прекращается. Таким образом, можно предположить, что слой до глубин порядка 50 см является для тонкодисперсных отложений профундали исследованных озер «активным илом», в пределах которого осуществляется интенсивная, постепенно замедляющаяся с глубиной, переработка микроорганизмами и окисление автохтонного и аллохтонного органического вещества, в том числе техногенного генезиса.

Заключение

Изучение закономерностей распределения и форм нахождения металлов, как группы приоритетных загрязняющих веществ, в составе донных отложений является актуальной задачей, решение которой позволит лучше понять глубинные механизмы, лежащие в основе самоочищения и вторичного загрязнения водоемов, прогнозировать статус их возможной деградации и сформулировать новые критерии экологических (лимнологических) оценок.

На примере водоемов Республики Татарстан показано, что активным слоем донных отложений, в котором протекают процессы био-

геохимической трансформации соединений металлов, поступающих из природных и техногенных источников, является поверхностный слой мощностью до 50 см.

Среди ведущих факторов, определяющих миграционную активность (подвижность) металлов в водоемах урбанизированных территорий, можно назвать pH среды и гранулометрический состав осадка. Слабощелочная среда донных отложений способствует снижению их подвижности, иммобилизуя их в составе поглощающего комплекса. Стратиграфическая неоднородность гранулометрического состава седиментов находит свое проявление в возрастании доли мелких частиц с глубиной, тем самым обуславливая снижение подвижности металлов от современных отложений к более древним и демонстрируя один из важных механизмов самоочищения водных масс от соединений токсичных металлов.

Установлено, что в донных отложениях фоновых водоемов правило Оддо – Гаркинса, определяющее отношение четных и нечетных химических элементов в биосфере и литосфере, выполняется для всех отношений валовых и подвижных форм металлов. Нарушение правила отмечается лишь для некоторых отношений подвижных форм (Mn/Fe, Cu/Zn) из-за роста содержания нечетных элементов.

В донных отложениях водоемов урбанизированных территорий г. Казани выделены типичные нарушения и тенденции к изменению соотношения Оддо – Гаркинса, которые напрямую связаны с изменениями соотношения форм нахождения металлов в выбросах и сбросах промышленных и коммунальных предприятий, поступающих в окружающую среду. В условиях антропогенного воздействия как критерий качественного состояния донных отложений хорошо проявляют себя изменчивость в них подвижных форм железа и отношение подвижных форм марганца и железа, отражающие уровень техногенной нагрузки на водоем.

Литература

Вернадский В. И. Химическое строение биосферы Земли и ее окружения. М.: Наука, 1965. 374 с.

Виноградов А. П. Химический элементарный состав организмов моря // Тр. Биогеохимической лаборатории АН СССР. 1935. Т. 3. С. 63–278.

ГОСТ 12536-2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава.

ГОСТ 17.1.5.01-80. Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к отбору проб донных отложений водных объектов для анализа на загрязненность.

ГОСТ 26213-91. Почвы. Методы определения органического вещества.

ГОСТ 26423-85. Почвы. Методы определения удельной электрической проводимости, рН и плотного остатка водной вытяжки.

Игнатова Т. Н. Региональные биогеохимические особенности накопления химических элементов в зольном остатке организма человека // Известия Томского политехнического ун-та. 2010. Т. 317, № 1. Науки о Земле. С. 178–183.

Никаноров А. М. Правило Оддо-Гаркинса и распространённость химических элементов в пресноводных экосистемах // ДАН. 2009. Т. 426, № 1. С. 110–114.

Переведенцев Ю. П., Шанталинский К. М., Шерстюков Б. Г., Наумов Э. П. Мониторинг современных изменений климата Среднего Поволжья // Уч. записки Казанского ун-та. 2010. Т. 152, № 2. С. 252–260.

Перельман А. И., Касимов Н. С. Геохимия ландшафта. М.: Астрей-2000, 1999. 767 с.

ПНД Ф 16.1:2.2:2.3.78-2013. Методика измерений массовой доли подвижных форм металлов:

меди, цинка, свинца, кадмия, марганца, никеля, кобальта, хрома в пробах почв, грунтов, донных отложений, осадков сточных вод методом пламенной атомно-абсорбционной спектроскопии.

РД 52.18.191-89. Методика выполнения измерений массовой доли кислоторастворимых форм металлов (меди, свинца, цинка, никеля, кадмия) в пробах почвы атомно-абсорбционным анализом.

РД 52.24.609-99. Организация и проведение наблюдений за содержанием загрязняющих веществ в донных отложениях.

Joshua E. O., Oyebanjo O. A. Grain-size and heavy mineral analysis of river Osun sediments // Australian journal of basic and applied science. 2010. P. 498–501.

Muller G., Offenstein R., Yahya A. Standardized particle size for monitoring, inventory, and assessment of metals and other trace elements: <20 µm or <2 µm? // Fresenius J. Anal. Chem. 2001. 371. P. 637–642.

Поступила в редакцию 06.06.2016

References

Vernadskij V. I. Himicheskoe stroenie biosfery Zemli i ee okruzenija [The chemical structure of the Earth's biosphere and its environment]. Moscow: Nauka, 1965. 374 p.

Vinogradov A. P. Himicheskij jelementarnyj sostav organizmov morja [The elementary chemical composition of marine organisms]. *Trudy biogeohimicheskoy laboratorii Akademii nauk SSSR [Transactions of the Biogeochemical Laboratory, Academy of Sciences of the USSR]*. 1935. Vol. 3. P. 63–278.

ГОСТ 12536-2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава [Soils. Methods of laboratory granulometric (grain-size) and microaggregate distribution].

ГОСТ 17.1.5.01-80. Охрана природы. Гидросфера. Общехие требования к отбору проб донных отложений водных объектов для анализа на загрязнённость [Nature protection. Hydrosphere. General requirements for sampling of bottom sediments of water objects for their pollution analysis].

ГОСТ 26213-91. Почвы. Методы определения органического вещества [Soils. Methods for determination of organic matter].

ГОСТ 26423-85. Почвы. Методы определения удельной электрической проводимости, рН и плотного остатка водной вытяжки [Soils. Methods for determination of specific electric conductivity, pH and solid residue of water extract].

Игнатова Т. Н. Regional'nye biogeohimicheskie osobennosti nakoplenija himicheskikh jelementov v zol'nom ostatke organizma cheloveka [Regional biogeochemical features of the chemical elements accumulation in the human body ash residue]. *Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University]*. Vol. 317, no. 1. P. 178–183.

Никаноров А. М. Pravilo Oddo-Garkinsa i rasprostranennost' himicheskikh jelementov v presnovodnyh jekosistemah [The Oddo-Harkins rule and chemical elements distribution in freshwater ecosystems]. *Doklady*

Akademii nauk [Dokl. Earth Sci.]. 2009. Vol. 426, no. 1. P. 110–114.

Peredencev Ju. P., Shantalinskij K. M., Sherstjukov B. G., Naumov Je. P. Monitoring sovremennykh izmenenij klimata Srednego Povolzh'ja [Monitoring of current climate changes of the Middle Volga region]. *Uchennye zapiski Kazanskogo universiteta [Proceedings of Kazan University]*. 2010. Vol. 152, no. 2. P. 252–260.

Perel'man A. I., Kasimov N. S. Geohimija landshafta [Geochemistry of landscape]. Moscow: Astrea-2000. 1999. 767 p.

ПНД Ф 16.1:2.2:2.3.78-2013. Методика измерений массовой доли подвижных форм металлов: меди, цинка, свинца, кадмия, марганца, никеля, кобальта, хрома в пробах почв, грунтов, донных отложений, осадков сточных вод методом пламенной атомно-абсорбционной спектроскопии [The procedure of mass fraction measurement of metals mobile forms: copper, zinc, lead, cadmium, manganese, nickel, cobalt, chromium in soil samples, soils, sediments, and sewage using flame atomic absorption spectrometry].

РД 52.18.191-89. Методика выполнения измерений массовой доли кислоторастворимых форм металлов (меди, свинца, цинка, никеля, кадмия) в пробах почвы атомно-абсорбционным анализом [The procedure of mass fraction measurement of the acid forms of metals (copper, lead, zinc, nickel, cadmium) in soil samples using atomic absorption analysis].

Joshua E. O., Oyebanjo O. A. Grain-size and Heavy Mineral Analysis of River Osun Sediments. *Australian Journal of Basic and Applied Science*. 2010. P. 498–501.

Muller G., Offenstein R., Yahya A. Standardized particle size for monitoring, inventory, and assessment of metals and other trace elements: <20 µm or <2 µm? *Fresenius J. Anal. Chem.* 2001. 371. P. 637–642.

Received June 06, 2016

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Валиев Всеволод Сергеевич

научный сотрудник
Институт проблем экологии и недропользования
Академии наук Республики Татарстан
ул. Даурская, 28, Казань, Республика Татарстан,
Россия, 420087
эл. почта: water-rf@mail.ru
тел.: (843) 2759573

Иванов Дмитрий Владимирович

заместитель директора по научной работе, к. б. н.
Институт проблем экологии и недропользования
Академии наук Республики Татарстан
ул. Даурская, 28, Казань, Республика Татарстан,
Россия, 420087
эл. почта: water-rf@mail.ru
тел.: (843) 2759573

Зиганшин Ирек Ильгизарович

старший научный сотрудник, к. г. н., доцент
Институт проблем экологии и недропользования
Академии наук Республики Татарстан
ул. Даурская, 28, Казань, Республика Татарстан,
Россия, 420087
эл. почта: Irek.Ziganshin@tatar.ru
тел.: (843) 2759573

Шамаев Денис Евгеньевич

младший научный сотрудник
Институт проблем экологии и недропользования
Академии наук Республики Татарстан
ул. Даурская, 28, Казань, Республика Татарстан,
Россия, 420087
эл. почта: water-rf@mail.ru
тел.: (843) 2759573

Маланин Виталий Викторович

научный сотрудник
Институт проблем экологии и недропользования
Академии наук Республики Татарстан
ул. Даурская, 28, Казань, Республика Татарстан,
Россия, 420087
эл. почта: water-rf@mail.ru
тел.: (843) 2759573

Марасов Антон Александрович

младший научный сотрудник
Институт проблем экологии и недропользования
Академии наук Республики Татарстан
ул. Даурская, 28, Казань, Республика Татарстан,
Россия, 420087
эл. почта: water-rf@mail.ru
тел.: (843) 2759573

CONTRIBUTORS:

Valiev, Vsevolod

Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth
Use of Tatarstan Academy of Sciences
28 Dauraskaya St., 420087 Kazan, Republic of Tatarstan,
Russia
e-mail: water-rf@mail.ru
tel.: (843) 2759573

Ivanov, Dmitry

Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth
Use of Tatarstan Academy of Sciences
28 Dauraskaya St., 420087 Kazan, Republic of Tatarstan,
Russia
e-mail: water-rf@mail.ru
tel.: (843) 2759573

Ziganshin, Irek

Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth
Use of Tatarstan Academy of Sciences
28 Dauraskaya St., 420087 Kazan, Republic of Tatarstan,
Russia
e-mail: Irek.Ziganshin@tatar.ru
tel.: (843) 2759573

Shamaev, Denis

Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth
Use of Tatarstan Academy of Sciences
28 Dauraskaya St., 420087 Kazan, Republic of Tatarstan,
Russia
e-mail: water-rf@mail.ru
tel.: (843) 2759573

Malanin, Vitaly

Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth
Use of Tatarstan Academy of Sciences
28 Dauraskaya St., 420087 Kazan, Republic of Tatarstan,
Russia
e-mail: water-rf@mail.ru
tel.: (843) 2759573

Marasov, Anton

Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth
Use of Tatarstan Academy of Sciences
28 Dauraskaya St., 420087 Kazan, Republic of Tatarstan,
Russia
e-mail: water-rf@mail.ru
tel.: (843) 2759573

УДК 556.555.3:556.114.7:556.16 (282.247.211)

ПОСТУПЛЕНИЕ В ОНЕЖСКОЕ ОЗЕРО ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА, ОБЩЕГО ФОСФОРА И ОБЩЕГО АЗОТА С РЕЧНЫМ СТОКОМ И ВЫНОС С ВОДАМИ Р. СВИРИ В 1965–2008 ГОДАХ

А. В. Сабылина

Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН

Дана оценка поступления органического углерода, соединений азота и общего фосфора с приточными водами в Онежское озеро за последние пятьдесят лет. Установлены основные причины, вызывающие его изменения.

Ключевые слова: водосборный бассейн; органический углерод; соединения азота; общий фосфор; природные воды.

A. V. Sabylina. ORGANIC CARBON, TOTAL PHOSPHORUS AND TOTAL NITROGEN INFLOW TO LAKE ONEGO WITH STREAM RUNOFF, AND THEIR REMOVAL BY SVIR RIVER WATERS IN 1965–2008

The inflow of organic carbon, nitrogen compounds and total phosphorus with runoff to Lake Onego during the last 50 years was estimated. The main factors causing changes in their influx to the lake were identified.

Keywords: catchment; organic carbon; nitrogen compounds; total phosphorus; natural waters.

Главная роль в формировании химического состава воды Онежского озера принадлежит речному стоку. Вынос химических веществ с водой рек можно рассматривать как интегральный показатель природных условий водосбора и хозяйственной деятельности на его территории.

Площадь водосборного бассейна озера равняется 53 100 км², площадь зеркала озера – 9720 км². Среднемноголетний водный сток в Онежское озеро равен 17,3 км³/год. На долю крупных четырех притоков – рек Водлы, Шуи, Суны и Андомы – приходится 60 % суммарного речного притока в озеро. Сток по р. Свири составляет 18,8 км³/год. Период условного водообмена озера равен 15,6 года [Балаганский и др., 2015].

Сток р. Шуи и Суны зарегулирован значительным количеством озер, большинство которых расположены по руслам рек. Например, в русле р. Шуи находится 16 озер. Озерность и заболоченность бассейнов этих рек одна из самых высоких в бассейне Онежского озера (табл. 1).

Преобладающая часть бассейна озера сложена кристаллическими породами Балтийского щита, перекрытыми небольшой мощности четвертичными отложениями (≤ 10 м). В южной части бассейна кристаллические породы перекрыты толщей палеозойских отложений (известняки, доломиты, мрамор), слагающих Русскую платформу.

Реки, дренирующие водосборный бассейн Онежского озера, имеют смешанный тип

Таблица 1. Характеристика притоков Онежского озера и их водосборов [Балаганский и др., 2015; Онежское озеро..., 2010]

| Река | Объем стока, км ³ /год | Длина, км | Водосбор | | |
|---------------------|-----------------------------------|-----------|-------------------------------|--------------|-------------------|
| | | | Площадь, тыс. км ² | Озерность, % | Заболоченность, % |
| Водла | 4,70 | 406 | 13,6 | 5,3 | 24 |
| Шуя | 3,02 | 279 | 10,3 | 10,4 | ~20 |
| Суна (оба русла) | 2,28 | 282 | 6,8 | 12,9 | 19 |
| Андома | 1,00 | 142 | 2,5 | 1,3 | 12 |
| Вытегра | 0,54 | 40 | 1,6 | <1 | 12 |
| Мегра | 0,35 | 93 | 1,2 | 4,0 | 6 |
| Пяльма | 0,42 | 72 | 0,93 | 1,7 | 10 |
| Немина | 0,28 | 76 | 0,62 | 2,8 | 16 |
| Лижма | 0,21 | 67 | 0,86 | 19,3 | 9 |
| Кумса | 0,23 | 67 | 0,74 | 8,5 | 7 |
| Черная | 0,20 | 88 | 0,60 | <1 | 8 |
| Уница | 0,15 | 55 | 0,40 | 2,4 | 10 |
| Туба | 0,23 | 16 | 0,31 | 3,5 | 5 |
| Ошта | 0,11 | 39 | 0,37 | <1 | 6 |
| Вичка | 0,05 | 23 | 0,13 | 3 | 8 |
| Шокша | - | 23 | 0,12 | 1,2 | 5 |
| Лососинка | 0,13 | 25 | 0,32 | 5,7 | 10 |

Таблица 2. Речной сток в Онежское озеро и сток из озера р. Свирь в 1965–2008 гг., км³/год

| Объект наблюдений | 1965–1966 | 1985–1986 | 2001–2002 | 2007–2008 |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Притоки озера | 15,55 | 12,75 | 14,00 | 17,79 |
| Р. Свирь | 15,75 | 14,35 | 14,77 | 19,17 |

питания, с преобладанием снегового. Основной фазой их гидрологического режима является весеннее половодье. Сокращение стока рек в период летней и зимней межени зависит от степени зарегулированности их водосборов. У притоков, испытывающих значительное влияние озер, осенние паводки имеют сглаженный характер.

Гидрохимические исследования на притоках озера проводились Институтом озероведения РАН [Соловьева, Расплетина, 1973] в 1965–1968 гг. и начиная с 1969 г. по настоящее время – Институтом водных проблем Севера [Пирожкова, Морозов, 1988; Пирожкова, 1990; Сабылина, 1998, 1999, 2007, 2015; Сабылина, Рыжак, 2007]. В 2001–2002 и 2007–2008 гг. наряду с комплексными работами на Онежском озере проводилось изучение химического состава воды притоков Онежского озера (28 рек) и его истока (р. Свирь) – в мае, июле, октябре и марте (рис. 1).

Общность климатических условий для всего водосборного бассейна озера определяет большое сходство основных химических показателей его вод. Однако неоднородность геологического и геоморфологического строения бассейна, которая иногда превалирует

над климатическими условиями, особенности его гидрографии являются причиной различия в химическом составе и режиме вод рек в пределах региона.

Для гидрохимической характеристики притоков озера последние были сгруппированы по ландшафтным особенностям [Соловьева, Расплетина, 1973; Сабылина, 2007, 2015]:

- реки западного и северо-западного побережья (Шуя, Суна (канал, старое русло), Лижма, Уница, Кумса, Вичка);
- Беломорско-Балтийский канал;
- реки северо-восточного побережья (Немина, Пяльма, Туба, Водла);
- реки юго-восточного и южного побережий (Черная, Андома, Вытегра, Мегра, Водлица, Ошта);
- реки юго-западного побережья (Рыбрека, Шокша, Пухта, Уя, Деревянка, Орзega, Нелукса, Лососинка, Неглинка).

При расчете поступления химических веществ в озеро с речным стоком и их стока из озера использованы данные П. Д. Швеца [1977] и А. Ф. Балаганского и др. [2015] о расходах воды (табл. 2) и материалы по химическому составу воды рек [Соловьева, Расплетина,

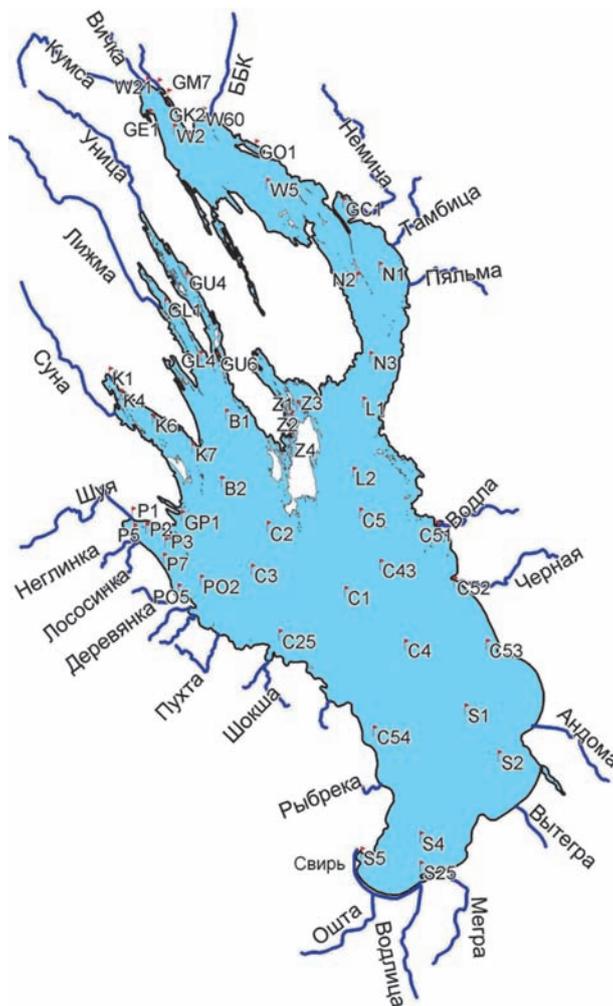


Рис. 1. Схема станций отбора проб

1973; Пирожкова, Морозов, 1988; Пирожкова, 1990; Сабылина, 1998, 1999, 2007, 2015; Сабылина, Рыжаков, 2007].

Речной сток в озеро органического углерода. В 1965–1966 и 2007–2008 гг. содержание общего $C_{орг}$ в воде притоков озера определяли по величине бихроматной окисляемости с использованием коэффициента пересчета кислородных величин в углеродные – 0,375. В 1985–1986 и 2001–2002 гг. определение содержания $C_{орг}$ осуществлялось фотохимическим методом в системе непрерывного газового потока [Мартынова и др., 1985] и по величине бихроматной окисляемости. Т. П. Кулиш [1996] провела экспериментальные работы по сопоставлению результатов определения содержания $C_{орг}$ прямым методом и расчетным для вод Ладожского озера и его притоков. Ее работы показали, что содержание $C_{орг}$, определенное прямым методом, близко к расчетным, и подтвердили правомерность использования коэффициентов пересчета кислородных величин в углеродные: для бихроматной окисляемости – 0,375.

Содержание органического углерода ($C_{орг}$) в притоках Онежского озера определяется множеством факторов, главными из которых являются климатические условия года (водность, температура и др.), геологическое строение водосбора, хозяйственная деятельность на водосборе, сезон года, а также интенсивность продукционно-деструкционных процессов в воде и почвах. Все воды бассейна озера, как и большинства рек таежной зоны, обогащены растворимыми гумусовыми веществами, что обуславливает высокие концентрации $C_{орг}$ (табл. 3).

Анализ многолетнего ряда наблюдений (1965–2008 гг.) на притоках Онежского озера показал, что в содержании суммарного углерода в воде рек, а следовательно, и в поступлении его в озеро, произошли некоторые изменения. 1965–1966 и 1985–1986 годы были маловодными (см. табл. 2). В 1990-х и 2000-х годах на фоне лет преимущественно повышенной водности выделяются крайне маловодные 2001–2002 гг., а 2007–2008 гг. относятся к годам повышенной водности (рис. 2).

Таблица 3. Среднегодовые концентрации общего углерода в воде притоков Онежского озера и р. Свири и поступление его в озеро с речным стоком и вынос с водами р. Свири в 1965–2008 гг.

| Объект наблюдений | 1965–1966 | 1985–1986 | 2001–2002 | 2007–2008 | 1965–1966 | 1985–1986 | 2001–2002 | 2007–2008 |
|---|----------------------------------|-----------|-----------|-----------|---------------------------|-----------|-----------|-----------|
| | Среднегодовые концентрации, мг/л | | | | Сток вещества, тыс. т/год | | | |
| Р. Водла | 15,2 | 14,3 | 13,4 | 18,1 | 63,41 | 58,48 | 64,39 | 93,32 |
| Р. Шуя | 12,3 | 14,6 | 16,1 | 16,8 | 41,07 | 45,69 | 52,41 | 58,24 |
| Р. Суна (Кондопожский канал) | 8,4 | 10,7 | 9,9 | 8,7 | 21,50 | 21,83 | 25,24 | 26,50 |
| Реки сев.-западн. и северного побережья | 11,7 | 12,9 | 15,8 | 12,7 | 10,65 | 9,44 | 10,22 | 17,80 |
| Реки сев.-восточн. побережья | 15,7 | 15,2 | 14,8 | 20,6 | 21,37* | 9,44 | 12,30 | 18,66* |
| Реки юго-восточн. и южного побережья | 16,8 | 17,1 | 18,6 | 18,9 | 39,90 | 39,68 | 36,70 | 50,48 |
| Реки юго-западн. побережья | 17,2 | 22,0 | 22,1 | 21,4 | 6,52 | 3,00 | 5,78 | 5,09 |
| Неучтенные притоки | - | - | - | 15,1 | - | - | - | 36,73 |
| Итого | 13,7 | 14,8 | 14,9 | 16,8 | 213,0 | 188,5 | 214,1 | 299,12 |
| Сток из озера, р. Свирь | 8,2 | 7,3 | 9,5 | 9,8 | 129,4 | 115,9 | 144,1 | 200,6 |

Примечание. *Учен сток рек полуострова Заонежье.

Как показали исследования, проведенные в 1965–2008 гг., в среднем за год реки выносят в Онежское озеро 228 тыс. т $C_{орг}$. За счет первичной продукции в Онежском озере в среднем за год образуется 172 тыс. т $C_{орг}$ [Теканова, 2012]. В середине 60-х годов прошлого столетия, когда антропогенное воздействие на водосборный бассейн озера было небольшое, вынос $C_{орг}$ составил 213 тыс. т/год (табл. 3; рис. 3). В 1965–1966 гг. постоянные сезонные наблюдения проводили на 22 притоках озе-

ра и эпизодически на нескольких малых реках в открытый период года (рис. 3).

В 1985–1986 гг. поступление $C_{орг}$ с реками в озеро составило 188,5 тыс. т/год. Сокращение выноса $C_{орг}$ с реками на 24 тыс. т/год в период, когда водосборный бассейн озера был наиболее подвержен антропогенному воздействию, обусловлено низкой водностью года, т. е. природным фактором.

В 2001–2002 гг. вынос $C_{орг}$ с приточными водами в озеро равнялся 214,1 тыс. т/год. Наблюдения проводили на 28 реках. По водности

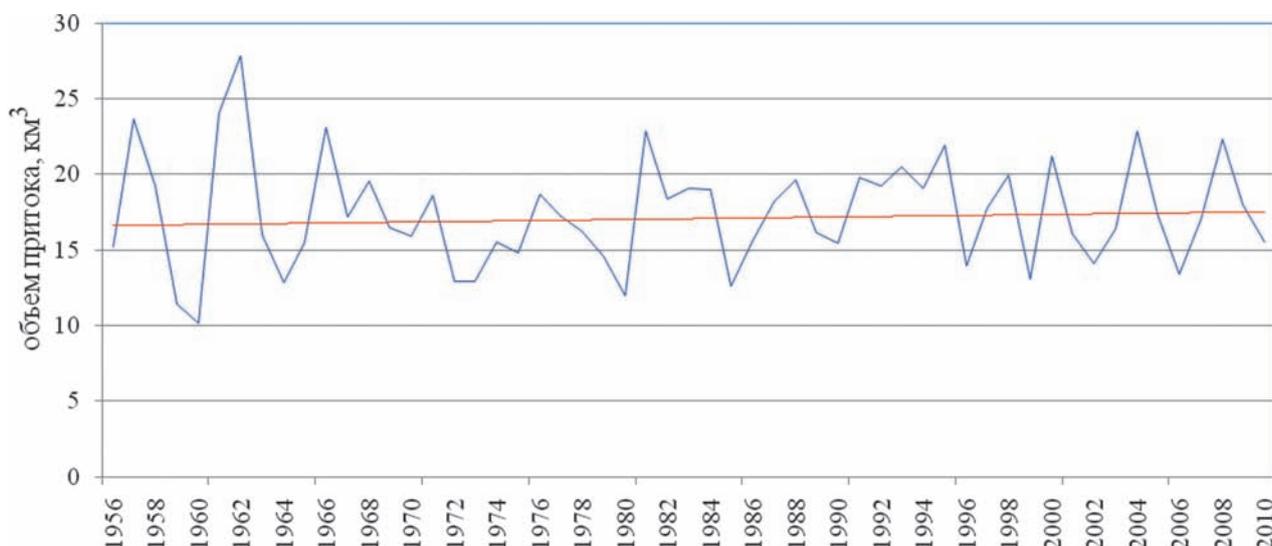


Рис. 2. Среднегодовой приток воды с водосборной площади Онежского озера по годам (за период с 1956 по 2010 г.) [Балаганский и др., 2015], км³

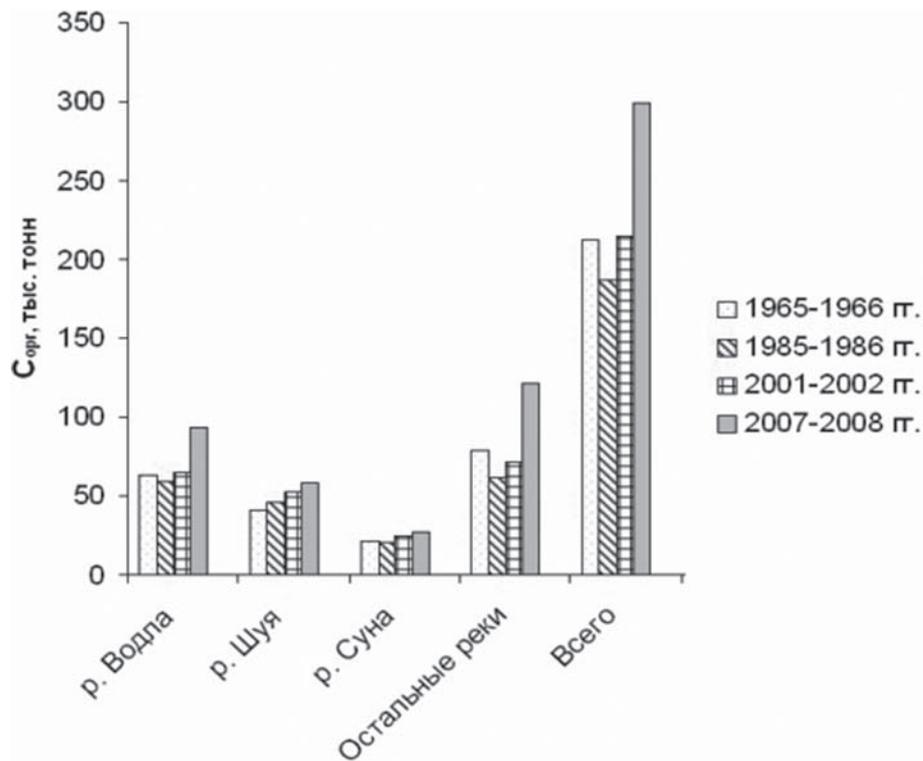


Рис. 3. Поступление органического углерода со стоком рек в Онежское озеро в 1965–2008 гг.

эти годы наблюдений были близки к 1965–1966 гг. (рис. 2). К концу 2000-х годов вынос $C_{орг}$ в озеро с речным стоком увеличился и составил 299 тыс. т/год. Повышение поступления $C_{орг}$ в озеро с приточными водами в эти годы связано как с многоводностью, так и с высокими концентрациями $C_{орг}$ в воде главных притоков озера (табл. 2, 3).

Основным источником пополнения запасов $C_{орг}$ в озере являются три главных притока – Водла, Шуя и Суна, с которыми вносятся около 70 % стока $C_{орг}$ в озеро. Из трех основных притоков Водла всегда являлась главным поставщиком $C_{орг}$ в озеро. Во все периоды наблюдений на ее долю приходилось 30 % $C_{орг}$ поступающего с речным стоком. С середины 80-х годов прошлого столетия поступление $C_{орг}$ с водой р. Шуи в озеро увеличивается (табл. 3), и связано это с сельскохозяйственной деятельностью на ее водосборе. Роль рек юго-восточного и южного побережий в стоке $C_{орг}$ выше, чем в водном стоке, и составляет 17–20 %.

Речной сток биогенных элементов. Поступление соединений азота (NH_4^+ , NO_3^- и $N_{орг}$) в Онежское озеро с водосборного бассейна за период с 1985 по 2008 г. изменялось от 8932 (2001 г.) до 10 129 (2008 г.) и 11 511 (1985 г.) тонн. Средняя за год концентрация общего азота в воде рек составляет 0,57–0,73 мг/л (табл. 4).

Основные изменения в химическом составе вод бассейна Онежского озера в 80-х годах прошлого столетия произошли в группе биогенных элементов [Сабылина, 1998, 1999]. Это связано с активизацией сельскохозяйственного использования водосборов рек Шуя, Водла, Вытегра, Пяльма, Андома: распашка земель, удобрение их и сенокосных угодий, мелиорация. Все это обогатило речные и озерные онежские воды биогенными элементами. Максимальное поступление соединений азота было отмечено во второй половине 80-х годов. Межгодовое и внутригодовое распределение стока биогенных элементов, как и $C_{орг}$, определяется главным образом распределением водного стока. Однако влияние климатических условий года на биогенный сток определяется не только изменениями объема водного стока, но и интенсивностью биохимических процессов в почвах водосбора, в воде рек и питающих их озер.

Поэтому изменения величин биогенного стока по годам не пропорциональны изменениям биогенного стока. В последние пятьдесят лет на величину биогенного стока оказывает влияние также и антропогенное воздействие на водосбор рек. В теплые и маловодные годы идет интенсивное потребление биогенных элементов фитопланктоном. Влияние ассимиляции особенно сказывается на концентрации нитратного азота. Так, в теплый и маловодный

Таблица 4. Среднегодовые концентрации общего азота и поступление его в Онежское озеро с речным стоком в 1985–2008 гг.

| Объект наблюдений | 1985–1986 | 2001–2002 | 2007–2008 | 1985–1986 | 2001–2002 | 2007–2008 |
|--------------------------------------|----------------------------------|-----------|-----------|----------------------|-----------|-----------|
| | Среднегодовые концентрации, мг/л | | | Сток вещества, т/год | | |
| Р. Водла | 0,79 | 0,70 | 0,67 | 2273 | 2794 | 2968 |
| Р. Шуя | 1,08 | 0,58 | 0,54 | 3492 | 1871 | 1690 |
| Р. Суна (Кондопожский канал) | 1,0 | 0,65 | 0,49 | 1673 | 1553 | 1249 |
| Реки сев.-западн. и сев. побережья | 0,85 | 0,78 | 0,62 | 681 | 643 | 459 |
| Реки сев.-восточн. побережья | 0,80 | 0,79 | 0,62 | 679 | 429 | 551 |
| Реки юго-восточн. и южного побережья | 0,94 | 0,60 | 0,66 | 2443 | 1346 | 1677 |
| Реки юго-западн. побережья | 1,28 | 1,42 | 1,26 | 152 | 296 | 291 |
| Неучтенные притоки | - | - | 0,98 | - | - | 1244 |
| Итого | 0,90 | 0,64 | 0,59 | 11 511 | 8932 | 10 129 |
| Сток из озера, р. Свирь | - | 0,54 | 0,56 | - | 10 147 | 10 416 |

Примечание. *Вынос минеральных форм азота (NH_4^+ и NO_3^-).

Таблица 5. Среднегодовой вынос соединений азота и общего фосфора отдельными притоками Онежского озера в 1985–1986 и 2007–2008 гг. [Сабылина, 2015; Пирожкова, Морозов, 1988], т

| Река | NH_4^+ | NO_3^- | $\text{N}_{\text{орг}}$ | $\text{P}_{\text{общ}}$ | NH_4^+ | NO_3^- | $\text{N}_{\text{орг}}$ | $\text{P}_{\text{общ}}$ |
|--------------------|-----------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|-----------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|
| | 1985–1986 гг. | | | | 2007–2008 гг. | | | |
| | | | | | | | | |
| Водла | 333 | 166 | 2273 | 133 | 177 | 266 | 2525 | 173 |
| Шуя | 416 | 238 | 2733 | 184 | 290 | 188 | 1212 | 119 |
| Суна (канал) | 196 | 236 | 1241 | 28 | 79 | 238 | 932 | 49 |
| Андома | 94 | 31 | 777 | 46 | 42 | 105 | 516 | 67 |
| Вытегра | 19 | 17 | 405 | 36 | 19 | 77 | 187 | 34 |
| Мегра | 79 | 14 | 561 | 18 | 5 | 14 | 102 | 20 |
| Пяльма | 22 | 0 | 305 | 7 | 16 | 36 | 199 | 16 |
| Немина | 20 | 0 | 179 | 10 | 11 | 20 | 141 | 20 |
| Лижма | 10 | 7 | 137 | 4 | 5 | 5 | 75 | 3 |
| Кумса | 13 | 24 | 150 | 4 | 11 | 18 | 90 | 4 |
| ББК | 12 | 8 | 184 | 4 | 10 | 4 | 78 | 6 |
| Черная | 39 | 5 | 118 | 9 | 9 | 9 | 75 | 10 |
| Уница | 14 | 2 | 165 | 2 | 11 | 12 | 80 | 4 |
| Туба | 7 | 2 | 82 | 3 | 4 | 9 | 62 | 3 |
| Ошта | 15 | 3 | 52 | 3 | 4 | 14 | 45 | 6 |
| Вичка | 3 | 9 | 34 | 1 | 3 | 14 | 18 | 1 |
| Шокша | 4 | 0 | 17 | 1 | 2 | 5 | 24 | 3 |
| Лососинка | 23 | 1 | 73 | 8 | 4 | 14 | 55 | 9 |
| Неглинка | 2 | 0 | 16 | 1 | 1 | 23 | 17 | 2 |
| Неучтенные притоки | - | - | - | - | 104 | 162 | 978 | 83 |
| Всего | 1321 | 763 | 9502 | 502 | 807 | 1233 | 7411 | 632 |

1985 г. сток нитратного азота в некоторых реках юго-восточного и юго-западного побережий (реки Пяльма, Немина, Шокша, Неглинка) снижается до нуля (табл. 5).

До середины 1980-х годов Водла из трех главных притоков озера выделялась по выносу минеральных форм азота. На ее долю приходилось 25 % (125 т) нитратного азота

Таблица 6. Среднегодовые концентрации общего фосфора и поступление его в Онежское озеро с речным стоком в 1965–2008 гг.

| Объект наблюдений | 1965–1966 | 1985–1986 | 2001–2002 | 2007–2008 | 1965–1966 | 1985–1986 | 2001–2002 | 2007–2008 |
|--|----------------------------------|-----------|-----------|-----------|----------------------|-----------|-----------|-----------|
| | Среднегодовые концентрации, мг/л | | | | Сток вещества, т/год | | | |
| Р. Водла | 45 | 32 | 37 | 42 | 186 | 133 | 136 | 173 |
| Р. Шуя | 33 | 54 | 34 | 38 | 104 | 184 | 111 | 119 |
| Р. Суна (Кондопожский канал) | 12 | 12 | 12 | 13 | 28 | 28 | 54 | 30 |
| Реки сев.-западн. и северного побережья | - | 16 | 18 | 21 | - | 18 | 20 | 16 |
| Реки сев.-восточного побережья | - | 29 | 34 | 45 | - | 21 | 29 | 39 |
| Реки юго-восточн. и южного побережья | - | 60 | 42 | 68 | - | 118 | 74 | 173 |
| Реки юго-запад- ного побережья | - | 74 | 60 | 62 | - | 10 | 17 | 24 |
| Неучтенные притоки | - | - | - | 34 | - | - | - | 83 |
| Итого | - | 40 | 32 | 38 | 650 | 512 | 441 | 676 |
| Р. Свирь | 19 | 17 | 16 | 16 | 299 | 268 | 230 | 298 |

и 38 % (472 т) аммонийного азота, поступающего с речным стоком [Соловьева, Расплетина, 1973]. В конце 70-х и начале 80-х в связи с активизацией сельскохозяйственной и мелиоративной деятельности на водосборе р. Шуи увеличился вынос минеральных форм азота в Онежское озеро.

Доля р. Шуи в выносе нитратного азота увеличилась с 21 % от общей величины в середине 60-х годов (486 т/год) до 31 % (763 т/год) [Пирожкова, Морозов, 1988]. В настоящее время основной вклад в вынос нитратного азота в озеро дают реки Шуя (34 %), Водла (21 %), Суна (9 %). Доля выноса аммонийного азота с водой главных притоков озера от общей величины (1321 т) следующая: Водла – 20 %, Суна (оба русла) – 18 % и Шуя – 14 %. С водами рек юго-восточного и южного побережий (реки Андома, Вытегра, Мегра, Водлица и Ошта) в озеро поступает около 21 % аммонийного азота. Доля рек северного побережья в его выносе небольшая и составляет 5 %.

На основании имеющихся материалов можно проследить изменение поступления общего фосфора в Онежское озеро за период с 1965 по 2008 г.

В 1965–1966 гг. во всех исследованных притоках озера определялся минеральный фосфор, органический фосфор – в трех главных притоках (Водле, Шуйе, Суне). Органический фосфор определялся методом сжигания органических соединений в серной кислоте. В остальных притоках озера концентрация органического фосфора рассчитывалась эмпирически, исходя из соотношения С:Р равным 400. Вынос в озеро общего фосфора ($P_{\text{общ}}$) с водой главных притоков составлял 318 т/год. Первое

место в поступлении $P_{\text{общ}}$ принадлежало Водле – 59 %, сток Шуи составлял 32 % и Суны – 9 % (табл. 6). По данным Н. Ф. Соловьевой и Г. Ф. Расплетинной [1973], в 1965–1966 гг. суммарный вынос $P_{\text{общ}}$ в озеро составил 650 т/год.

Интенсификация хозяйственной деятельности в целом в бассейне озера, и особенно сельскохозяйственной деятельности на территории водосборных бассейнов рек южного побережья и р. Шуи, в конце 70-х и в 80-х годах привела к резкому увеличению поступления $P_{\text{общ}}$ с водой этих рек в озеро. Следует учесть, что начиная с середины 80-х и в последующие годы органический фосфор определялся во всех притоках озера.

Вынос $P_{\text{общ}}$ с водой рек в озеро в 1985–1986 гг. составлял 512 т/год, что на 138 т меньше, чем в 1965–1966 гг. По водности эти годы были близки (рис. 2). Представленные в таблице 6 среднегодовые концентрации $P_{\text{общ}}$ и среднегодовой вынос его с водой рек отчетливо демонстрируют выраженное повышенное содержание $P_{\text{общ}}$ в воде р. Шуи в середине 80-х годов. В 1985–1986 гг. среднегодовая концентрация $P_{\text{общ}}$ в ее воде увеличилась в 1,6 раза по сравнению с 1965–1966 гг. Главные притоки в эти годы по-прежнему являлись основными поставщиками $P_{\text{общ}}$ (345 т) в озеро, но первое место в его выносе стало принадлежать р. Шуйе (184 т/год). На ее долю приходилось 53 % от величины, вносимой главными притоками, и 34 % от общего поступления фосфора в озеро. Остальные реки водосбора дают около 33 % фосфора (рис. 4).

Вынос $P_{\text{общ}}$ с приточными водами в озеро в 2007–2008 гг. составлял 676 т. В эти годы в период открытой воды дополнительно

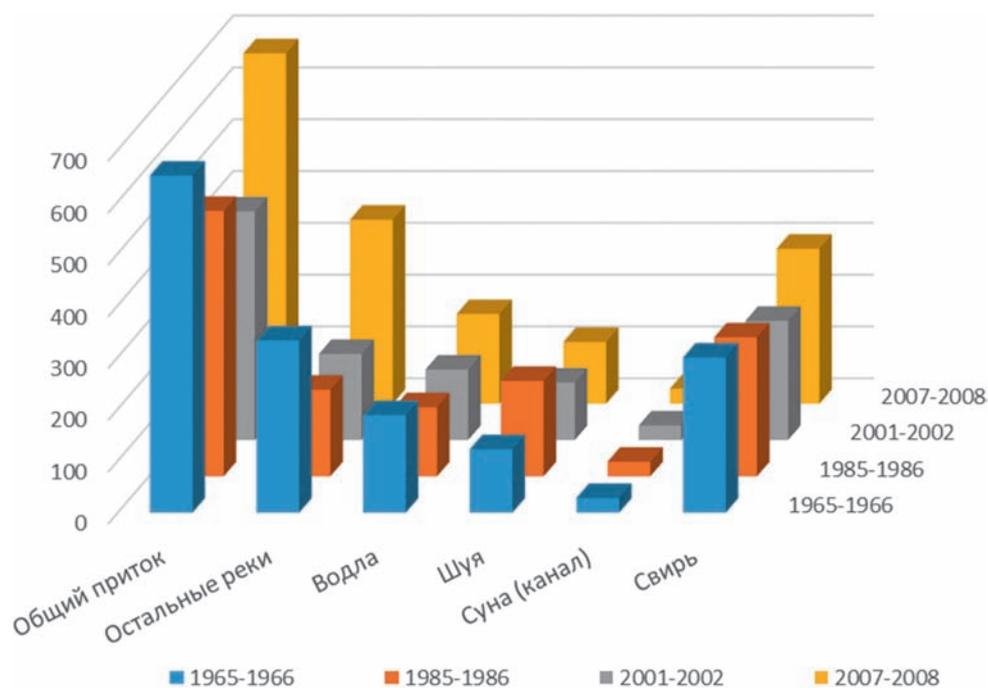


Рис. 4. Поступление $P_{\text{общ}}$ с приточными водами в Онежское озеро и вынос с рекой Свирь, т/год

проводились исследования на малых реках. В годовом поступлении $P_{\text{общ}}$ основная роль принадлежит р. Водле (26 % общего речного поступления), на долю р. Шуи приходится 18 %.

Гидрохимический режим р. Свири в ее истоке определяется главным образом режимом Онежского озера. Однако средние концентрации некоторых химических веществ в истоке р. Свири отличаются от средних значений для водной массы озера. Река берет начало в юго-западной части Онежского озера (Свирская губа). В истоке река соединяется с Онежским обводным каналом, по которому в ее русло, минуя озеро, поступает часть стока малых рек и южных притоков озера. Воды южных притоков отличаются повышенной минерализацией, содержанием органических веществ и биогенных элементов. Кроме того, здесь также могут играть роль локальные воздействия: поверхностно-склоновый сток во время дождевых паводков, поступление сточных вод крупного пгт Вознесенье. В связи с этими факторами среднегодовая концентрация $C_{\text{орг}}$ в истоке р. Свири выше, чем в среднем для озера. В 1965–1966 гг. она равнялась 7,3 мг/л, в 2007–2008 гг. – 9,8 мг/л. Вынос $C_{\text{орг}}$ из озера в первом случае составлял 124 тыс. т/год, а во втором – 200,6 тыс. т/год. Вынос общего $C_{\text{орг}}$ с водами р. Свири был наименьшим в маловодные 1985–1986 гг. (табл. 3).

Зависимость концентрации биогенных элементов в воде р. Свири от ее расходов

выражена слабо, так как Онежское озеро обладает высокой гидрохимической «инерцией» (водообмен озера равен 15,6 года). В среднем за год р. Свирь выносит из Онежского озера 9900 т общего азота. С водами р. Свири минеральный азот выносится в основном в виде нитратного азота, составляющего 36 % от общего азота.

Вынос $P_{\text{общ}}$ из озера в среднем за год составляет около 270 т. Среднегодовая концентрация $P_{\text{общ}}$ в речном стоке за период с 1985 по 2008 год составляет 16 мкг/л.

Выводы

Многолетние наблюдения на притоках Онежского озера показали, что основным источником поступления $C_{\text{орг}}$ в озеро является речной сток. Среднегодовое содержание общего $C_{\text{орг}}$ в притоках озера за период с 1985 по 2008 г. составляет 228 тыс. т. Вынос $C_{\text{орг}}$ с речными водами в озеро определяется водностью года и повышением концентрации его в воде некоторых притоков, испытывающих антропогенную нагрузку.

Вынос общего азота с водой рек за период 1985–2008 гг. в среднем составил около 10 тыс. т/год. Средняя за год концентрация общего азота в воде рек изменяется от 0,57 до 0,73 мг/л.

Сток $P_{\text{общ}}$ с речными водами в озеро изменялся от 441 т (2001–2002 гг.) до 673 т (2007–2008 гг.).

Среднегодовое содержание $P_{\text{общ}}$ в притоках озера в 1985–2008 гг. составляет 33 мкг/л.

Изменение величин биогенного стока по годам не всегда пропорционально объему водного стока и в значительной степени зависит от антропогенного воздействия на водосборные бассейны рек.

Литература

Балаганский А. Ф., Карпечко В. А., Литвиненко А. В., Сало Ю. А. Ресурсы речного стока и водный баланс // Крупнейшие озера-водохранилища северо-запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. С. 31–38.

Кулиш Т. П. Гидрохимические исследования системы органического углерода озерной воды // Ладожское озеро – прошлое, настоящее и будущее. СПб.: Наука, 2002. С. 107–111.

Мартынова Н. Н., Лозовик П. А., Глинский А. М. Определение органического углерода в природных водах с использованием системы непрерывного газового потока // Органическое вещество и биогенные элементы в водах Карелии. Петрозаводск: Карельский фил. АН СССР, 1985. С. 191–203.

Онежское озеро. Атлас / Отв. ред. Н. Н. Филатов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. 151 с.

Пирожкова Г. П. Гидрохимический режим озера и его изменение под влиянием антропогенного воздействия // Экосистема Онежского озера и тенденции ее изменения. Л.: Наука, 1990. С. 95–146.

Пирожкова Г. П., Морозов А. К. Химический сток с бассейна в Онежское озеро // Притоки Онежского озера. Петрозаводск: Карельский филиал АН СССР, 1988. С. 4–8.

Сабылина А. В. Гидрохимические исследования Онежского озера // Крупнейшие озера-водохранилища северо-запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. С. 60–88.

Сабылина А. В. Онежское озеро и его притоки. Внешняя нагрузка на Онежское озеро // Состояние водных объектов Республики Карелия. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. С. 19–21.

Сабылина А. В. Онежское озеро. Химический состав воды // Современное состояние водных объектов Республики Карелия. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1998. С. 40–51.

Сабылина А. В. Современный гидрохимический режим Онежского озера // Онежское озеро, экологические проблемы. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1999. С. 58–108.

Сабылина А. В., Рыжаков А. В. Химический состав воды озера // Состояние водных объектов Карелии. По результатам мониторинга 1998–2006 гг. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. С. 29–39.

Соловьева Н. Ф., Расплетина Г. Ф. Гидрохимия притоков Онежского озера и элементы его химического баланса // Гидрохимия Онежского озера и его притоков. Л.: Наука, 1973. С. 3–129.

Теканова Е. В. Вклад первичной продукции в содержание органического углерода в Онежском озере // Биология внутренних вод. 2012. № 4. С. 38–43.

Швец Л. Д. Водный баланс Онежского озера (Верхне-Свирского водохранилища) за многолетний период и характерные по водности годы // Исследования режима и расчеты водного баланса озер-водохранилищ Карелии: Сб. работ Ленинградской гидрометеобсерватории. Л., 1977. Вып. 11. С. 25–53.

Поступила в редакцию 11.02.2016

References

Balaganskij A. F., Karpechko V. A., Litvinenko A. V., Salo Ju. A. Resursy rechnogo stoka i vodnyj balans [River runoff resources and water balance]. Krupnejshie ozera-vodohranilishha severo-zapada evropejskoj territorii Rossii: sovremennoe sostojanie i izmenenija jekosistem pri klimaticheskikh i antropogennykh vozdeystvijah [The largest lake-reservoirs of the North-west European part of Russia: current state and change of ecosystems under climatic and anthropogenic influences]. Petrozavodsk: KarNC RAN, 2015. P. 31–38.

Kulich T. P. Gidrokhimicheskie issledovaniya sistemy organicheskogo ugleroda ozernoi vody [Hydrochemical study of organic carbon of lake water system]. Ladozhskoe ozero – proshloe, nastoyashchee i budushchee [Ladoga Lake – the past, present and future]. St. Petersburg: Nauka, 2002. P. 107–111.

Martynova N. N., Lozovik P. A., Glinskij A. M. Opredelenie organicheskogo ugleroda v prirodnykh vodah s ispol'zovaniem sistemy nepreryvnogo gazovogo potoka [Determination of organic carbon concentrations in natural waters with continuous gas flow]. Organicheskoe

veshhestvo i biogennye jelementy v vodah Karelii [Organic matter and biogenic elements in Karelian water]. Petrozavodsk: Karel. fil. AN SSSR, 1985. P. 191–203.

Onezhskoe ozero. Atlas [Lake Onego. Atlas]. Ed. N. N. Filatov. Petrozavodsk: KarNC RAN, 2010. 151 p.

Pirozhkova G. P. Gidrokhimicheskij rezhim ozera i ego izmenenie pod vlijaniem antropogennogo vozdeystvija [Hydrochemical regime of the lake and its variations under anthropogenic impact]. Jekosistema Onezhskogo ozera i tendencii ee izmenenija [Onego Lake ecosystem and trends in its variations]. Leningrad: Nauka, 1990. P. 95–146.

Pirozhkova G. P., Morozov A. K. Himicheskij stok s bassejna v Onezhskoe ozero [Chemical runoff from the basin into Lake Onego]. Pritoki Onezhskogo ozera [Tributaries of Lake Onego]. Petrozavodsk: Karel'skii filial AN SSSR, 1988. P. 4–8.

Sabylina A. V. Onezhskoe ozero. Himicheskij sostav vody [Lake Onego. Water chemistry]. Sovremennoe sostojanie vodnykh ob'ektov Respubliki Karelija [Current

state of water bodies in the Republic of Karelia]. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 1998. P. 40–51.

Sabylina A. V. Sovremennyy gidrohimicheskij rezhim Onezhskogo ozera [Modern hydrochemical regime of Lake Onego]. Onezhskoe ozero, jekologicheskie problemy [Lake Onego: environmental problems]. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 1999. P. 58–108.

Sabylina A. V. Onezhskoe ozero i ego pritoki. Vneshnjaja nagruzka na Onezhskoe ozero [Lake Onego and its tributaries. External load on Lake Onego]. Sostojanie vodnyh ob'ektov Respubliki Karelija [State of water bodies in the Republic of Karelia]. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2007. P. 19–21.

Sabylina A. V. Gidrohimicheskie issledovanija Onezhskogo ozera [Hydrochemical studies of Lake Onego]. Krupnejšie ozera-vodohranilishha severo-zapada evropejskoj territorii Rossii: sovremennoe sostojanie i izmenenija jekosistem pri klimaticeskikh i antropogennyh vozdejsťvijah [The largest lake-reservoirs of the Northwest European part of Russia: current state and change of ecosystems under climatic and anthropogenic influences]. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2015. P. 60–88.

Sabylina A. V., Ryzhakov A. V. Khimicheskij sostav vody ozera [The chemical composition of the lake water]. Sostojanie vodnykh ob'ektov Karelii. Po rezul'tatam monitoringa 1998–2006 gg. [Status of Karelian water

bodies. According to the results of monitoring 1998–2006]. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2007. P. 29–39.

Solov'eva N. F., Raspletina G. F. Gidrohimija pritokov Onezhskogo ozera i jelementy ego himicheskogo balansa [Hydrochemistry of tributaries of Lake Onego and elements of its chemical balance]. Gidrohimija Onezhskogo ozera i ego pritokov [Hydrochemistry of Lake Onego and its tributaries]. Leningrad: Nauka, 1973. P. 3–129.

Tekanova E. V. Vklad pervichnoj produkcii v sodержanie organicheskogo ugleroda v Onezhskom ozere [The contribution of primary production to organic carbon content in Lake Onego]. *Biologija vnutrennih vod* [Inland water biology]. 2012. No. 4. P. 38–43.

Shvec L. D. Vodnyj balans Onezhskogo ozera (Verhne-Svirskogo vodohranilishha) za mnogoletnij period i harakternye po vodnosti gody [Long-term water balance of Lake Onego (Upper Svir reservoir) and specific water years]. Issledovanija rezhima i raschety vodnogo balansa ozer-vodohranilishh Karelii: Sb. rabot Leningradskoj gidrometeoobservatorii [Study of water regime and calculation of water balance of lake-reservoirs in Karelia: Collected papers of Leningrad hydrometeorological observatory]. Leningrad, 1977. Iss. 11. P. 25–53.

Received February 11, 2016

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

Сабылина Альбина Васильевна

старший научный сотрудник, к. х. н.
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск,
Республика Карелия, Россия, 185030
тел.: (8142) 576541

CONTRIBUTOR:

Sabylina, Albina

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
tel.: (8142) 576541

ГИДРОБИОЛОГИЯ И ИХТИОЛОГИЯ

УДК 597.553.2.574.3

К МЕТОДИКЕ РАСЧИСЛЕНИЯ ТЕМПА РОСТА СИГА *COREGONUS LAVARETUS* (L.) ВОДОЕМОВ СЕВЕРНОЙ ФЕННОСКАНДИИ*

Е. М. Зубова, Н. А. Кашулин, П. М. Терентьев

*Институт проблем промышленной экологии Севера
Кольского научного центра РАН*

Для различных экологических форм сига водоемов Мурманской области проведен подробный морфологический анализ регистрирующей минерализованной структуры – чешуи; уточнена и оптимизирована методика обратного расчисления длины рыб по чешуе. Показана неравномерность относительной скорости роста различных секторов чешуи в течение жизни при постоянстве ее формы. Для обратных расчислений длины рыб рекомендовано использовать передний диагональный радиус чешуи.

Ключевые слова: сиг *Coregonus lavaretus* (L.); оз. Имандра; озера системы р. Пасвик; чешуя; обратные расчисления длины.

E. M. Zubova, N. A. Kashulin, P. M. Terentjev. GO TO THE METHOD OF GROWTH RATE BACK-CALCULATION OF WHITEFISH *COREGONUS LAVARETUS* (L.) IN RESERVOIRS OF NORTHERN FENNO-SCANDIA

For different morphs of whitefish in waters of the Murmansk region morphological detailed analysis of the recording and mineralized structures (scale) have been conducted, and the method of length back-calculation of the fish on the scale have been optimized. This paper shows irregularity of relative growth of different scale sectors throughout the life of the fish at constant scale form. Anterior diagonal radius of the scale is recommended for back-calculations of fish body length.

Key words: whitefish *Coregonus lavaretus* (L.); lake Imandra; lakes of Pasvik river system; scale; back-calculated length.

* Материалы были представлены на V Международной конференции молодых ученых «Водные ресурсы: изучение и управление» (Лимнологическая школа-практика) «Water Resources: Research and Management» (WRRM)

Введение

Познание механизмов регуляции роста рыб и выявление факторов, определяющих его темп, позволяет использовать параметры роста в биоиндикации состояния окружающей среды, дает возможность прогнозировать рыбопродуктивность водоемов [Никольский, 1974; Кузнецова, 2003], служит основой при разработке принципов рационального использования и охраны рыбных ресурсов. Линейные размеры, в частности длина особи, – более стабильный и удобный показатель, нежели вес [Мина, Клевезаль, 1976], а обратные расчисления длины необходимы для реконструкции его показателей в течение жизни особи и уменьшения ошибки, связанной с различиями сезонных приростов последнего года [Зиновьев, Мандрица, 2003].

Чешуя, как регистрирующая структура, наиболее часто используется для обратных расчислений длины у рыб Северного полушария [Решетников, 1966, 1980; Черешнев, Скопец, 1992; Kahilainen et al., 2003; Тягун, 2004; Заварзина, 2005; Зиновьев, 2005; Зубова, 2015; Зубова и др., 2015 и др.]. Это требует подробного

изучения ее морфологии и размерно-возрастной изменчивости [Вовк, 1956]. Для исследования темпа роста рыб необходим более точный выбор метода обратных расчислений по чешуе, объективно отражающий линейные показатели рыб каждой возрастной группировки [Брюзгин, 1969; Мина, 1973, 1981].

В настоящей работе представлены результаты исследования морфологии чешуи, уточнена и оптимизирована методика обратного расчисления длины по чешуе у сига *Coregonus lavaretus* (L.) оз. Имандра и озер системы р. Пасвик (Виртуовошъяур и Куэтсъярви). Широко распространенный в водоемах Мурманской области сиг в силу своих биологических особенностей многие годы используется как тест-объект ихтиологического мониторинга [Моисеенко, 1991, 2000, 2002; Кашулин, 1999; Кашулин и др., 1999; Шарова, Лукин, 2000 и др.]. При описании популяционных характеристик сига в условиях антропогенного загрязнения оз. Имандра и водоемов системы р. Пасвик большое внимание всегда уделялось изменению ростовых характеристик рыб [Моисеенко, 1997, 2000, 2002; Кашулин, 1999, 2004; Кашулин и др., 1999]. Было показано, что одной из

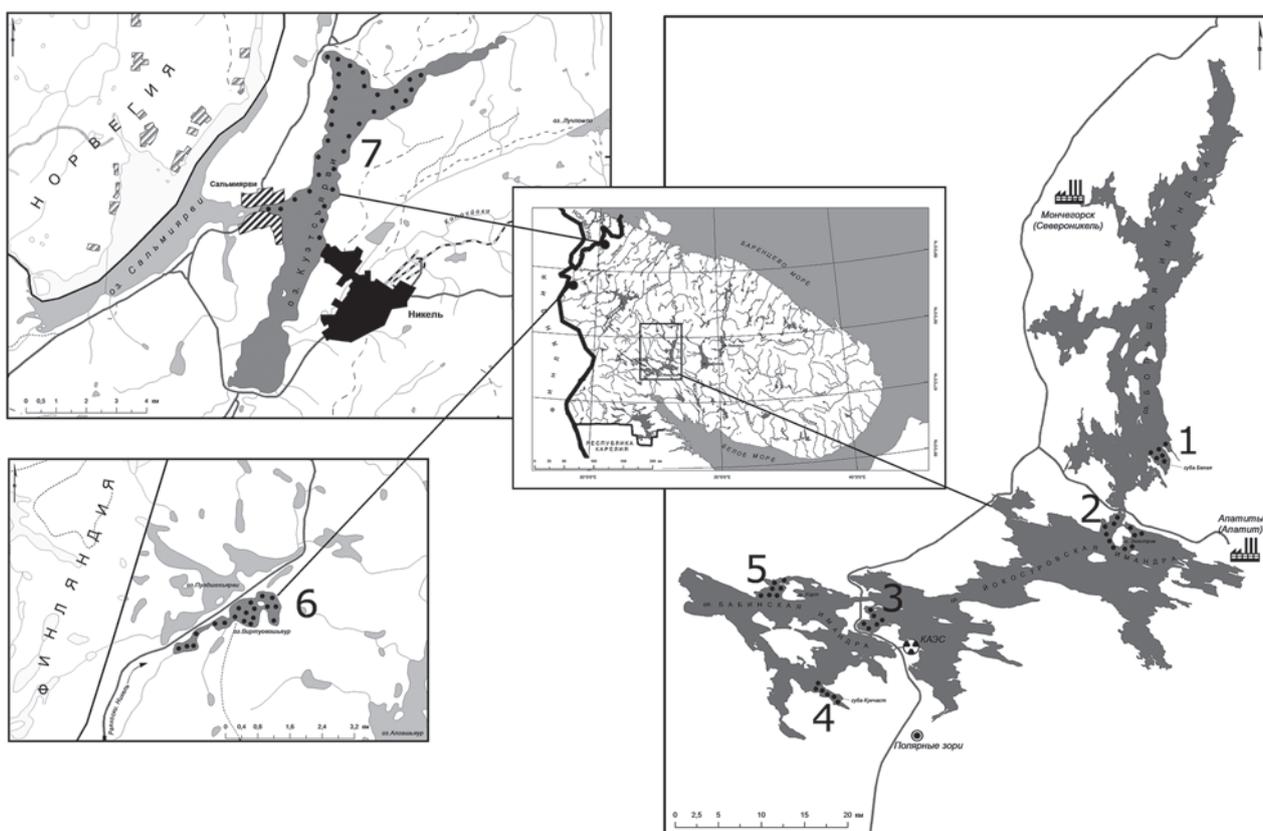


Рис. 1. Места сбора ихтиологического материала (●) в 2011–2013 гг.: оз. Имандра (1 – губа Белая и район о. Могильный, 2 – пролив между м. Кукисьярк и о. Большой Йокостровский, 3 – пролив Узкая Салма, 4 – район о. Хорт, 5 – губа Кунчуст); водоемы системы р. Пасвик (6 – оз. Виртуовошъяур, 7 – оз. Куэтсъярви)

Таблица 1. Характеристика использованного материала

| Исследуемый водоем | | Период исследований | Кол-во экз. |
|----------------------|---|---|-------------|
| Оз. Имандра | Плес Большая Имандра (губа Белая, остров Могильный) | сентябрь–октябрь 2012–2013 гг. | 47 |
| | Плес Йокостровская Имандра (пролив Узкая Салма, остров Большой Йокостровский) | август–сентябрь, 2011 г., ежемесячно с июля по апрель 2012–2013 гг. | 460 |
| | Плес Бабинская Имандра (губа Кунчаст, остров Хорт) | август–сентябрь 2011 г. | 140 |
| Система р. Пасвик | Оз. Виртуовошъяур | август 2013 г. | 101 |
| | Оз. Куэтсъярви | июль–сентябрь 2012 г. | 402 |

реакций сига на изменение условий обитания в сильно загрязняемых участках оз. Имандра (плесе Большая Имандра) и водоемах системы р. Пасвик (оз. Куэтсъярви) является изменение скорости роста и полового созревания рыб. Методические особенности обратных расчетов размерных характеристик сига исследуемых водоемов не приводились.

Материалы и методы

Изучение роста сига проводилось в рамках комплексных исследований внутренних водоемов Мурманской области в 2011–2013 гг. Они сосредотачивались на водосборе самого крупного озера области – Имандры (880 км²) (бассейн Белого моря) и пограничной с Норвегией озерно-речной системы Пасвик (бассейн Баренцева моря). Районы исследований – три плеса оз. Имандра (Большая Имандра, Йокостровская Имандра и Бабинская Имандра) и озера системы р. Пасвик (Виртуовошъяур – верхнее течение реки, Куэтсъярви – нижнее течение реки) (рис. 1; табл. 1). Во всех исследуемых водоемах рыбу отлавливали ставными жаберными донными сетями из нейлонового монофиламенты длиной 25 м, высотой 1,5 м и с размером ячеи 10; 12,5; 16; 22; 25; 30; 35; 38 и 45 мм, что обеспечивало вылов рыбы длиной ≥ 5 см. В литоральной зоне (на глубине 1,5–3 м) устанавливалось по 1–2 сети перпендикулярно берегу в местах с песчано-гравийными отмелями и крупными валунными отложениями. В профундальной зоне с глубинами более 18 м использовалось до 10 сетей в один порядок. В пелагической зоне водоема для отбора ихтиологического материала применялись плавные мультиразмерные сети высотой 3 м. Обработка материала проводилась по стандартной методике [Правдин, 1966]. Массу рыб определяли с точностью до 1 г, длину по Смиту (АС) измеряли с точностью до 1 мм. Для выделения внутривидовых форм у исследуемых сигов подсчитывали число тычинок на первой

жаберной дуге [Решетников, 1980]. Чешуя для исследования всегда бралась с одного и того же участка – под передней частью спинного плавника [Зиновьев, Мандрица, 2003]. У рыбы для определения возраста просматривалось под биноклем 4–6 чешуй (годовые кольца просматривались по всем секторам чешуи), после чего выбиралась чешуя наиболее правильной формы и исследовались ее морфологические особенности. Для этого проводились дополнительные измерения с помощью окуляр-микрометра ее продольного и поперечного диаметров, а также радиусов: переднего (базального) и переднего диагонального. Боковой и задний (каудальный) радиусы не измерялись, их находили путем деления значения поперечного диаметра на 2 и вычитания из значения продольного диаметра значения переднего радиуса соответственно. На основе этих измерений были определены: J – относительный размер чешуи, B – форма (ширина) чешуи и br – положение ядра чешуи [Чернова, Дгебуадзе, 2008]. Для описания возрастных изменений секторов чешуи сига (переднего, бокового и заднего) использовались их значения в процентах от длины тела (АС) [Вовк, 1956].

Результаты и обсуждение

Сиг в оз. Имандра представлен двумя экологическими формами: малотычинковой, обитающей во всех плесах, и среднетычинковой – малочисленной и приуроченной лишь к северному плесу Большая Имандра. Число тычинок у малотычинковой формы варьирует от 15 до 30 и составляет в среднем для озера $23 \pm 0,1$; у среднетычинковой формы – от 31 до 43, в среднем $38 \pm 3,4$. Из-за небольшого числа особей среднетычинкового сига (17 экземпляров) далее в работе будут приводиться данные только по малотычинковому сигу Имандры. В оз. Виртуовошъяур системы р. Пасвик сиг был представлен малотычинковой формой с числом тычинок на первой жаберной дуге от

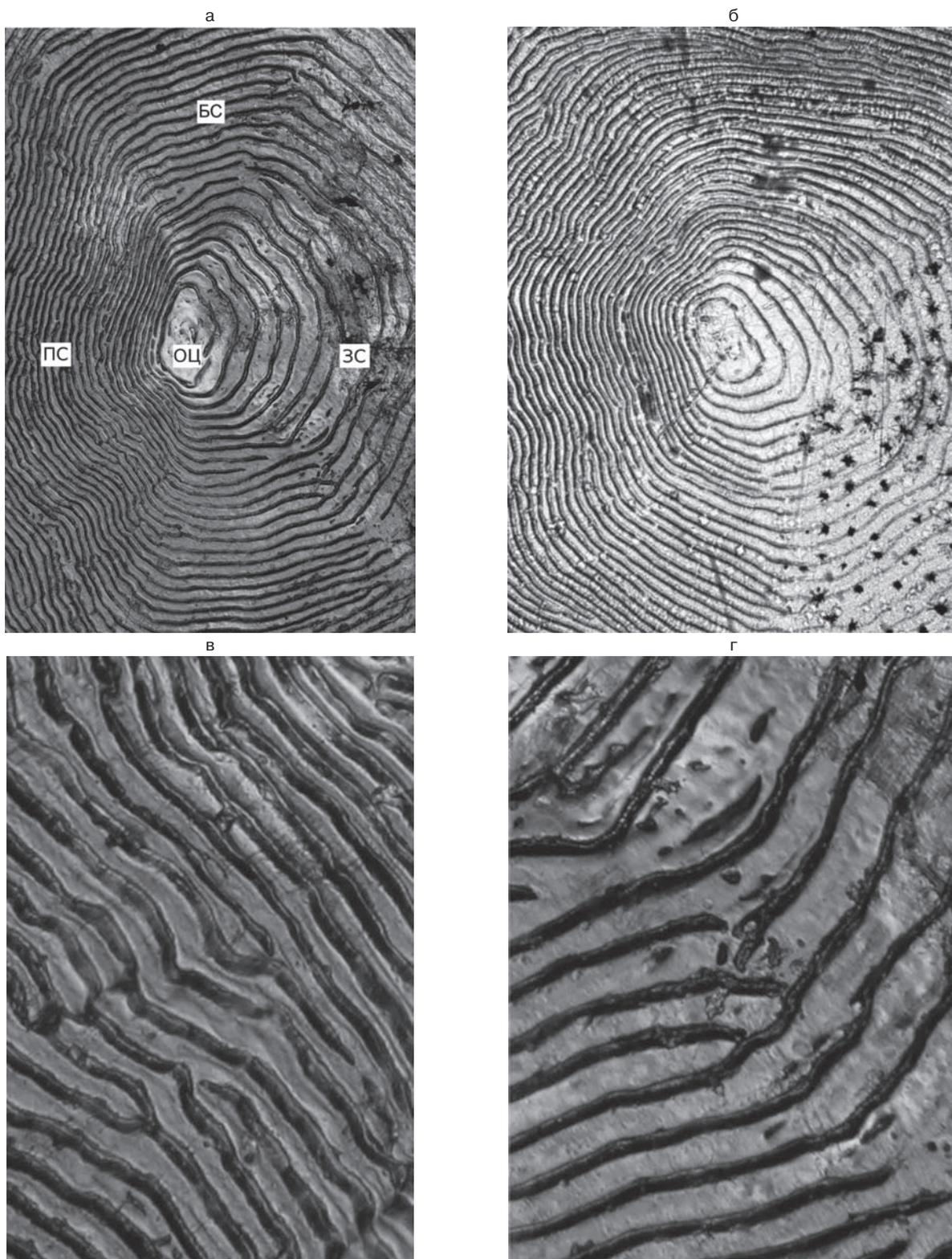


Рис. 2. Строение чешуи малотычинкового сига плеса Йокостровская Имандра оз. Имандра в возрасте 3+ (AC = 265 мм) (а) и среднетычинкового сига оз. Куэтсьярви в возрасте 3+ (AC = 145 мм) (б); удвоение склеритов на переднем секторе чешуи (в) и «обрывание» склеритов на границе бокового и заднего секторов чешуи (г) малотычинкового сига плеса Йокостровская Имандра оз. Имандра в возрасте 3+ (AC = 265 мм); ОЦ – область центра, ПС – передний сектор, БС – боковой сектор, ЗС – задний сектор. Увеличение: а, б – ок. 10 ×, об. 5 ×; в, г – ок. 10 ×, об. 20 ×

Таблица 2. Изменение относительного размера чешуи (J), %, относительного положения ядра чешуи (br), %, и формы чешуи (B) с возрастом у сига *Coregonus lavaretus* оз. Имандра и водоемов системы р. Пасвик, 2011–2013 гг.

| Показатель морфологии чешуи | Возраст, лет | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------------|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------|------|------|-----------|
| | 0+ | 1+ | 2+ | 3+ | 4+ | 5+ | 6+ | 7+ | 8+ | 9+ | 10+ | 11+ | 12+ | 14+ |
| Оз. Имандра, малотычинковый сиг | | | | | | | | | | | | | | |
| J | 1,56±0,03 | 1,39±0,04 | 1,52±0,03 | 1,62±0,02 | 1,65±0,01 | 1,70±0,02 | 1,73±0,03 | 1,77±0,05 | 1,84±0,14 | 1,71 | - | - | - | - |
| br | 38,9±0,0 | 43,5±0,8 | 47,2±0,7 | 51,5±0,4 | 52,8±0,3 | 53,9±0,4 | 56,3±0,5 | 58,3±0,9 | 58,8±5,9 | 53,2 | - | - | - | - |
| B | 1,06±0,01 | 0,95±0,01 | 0,97±0,01 | 0,98±0,01 | 1,01±0,02 | 1,00±0,01 | 0,99±0,01 | 0,97±0,02 | 0,99±0,15 | 0,97 | - | - | - | - |
| Кол-во экз. | 2 | 19 | 45 | 137 | 207 | 135 | 64 | 22 | 2 | 1 | - | - | - | - |
| Оз. Виртуовошъяур, малотычинковый сиг | | | | | | | | | | | | | | |
| J | 1,34 | 1,54±0,13 | 1,62±0,03 | 1,49±0,05 | 1,41±0,04 | 1,46±0,05 | 1,68±0,08 | 1,54±0,07 | 1,78±0,01 | 1,73±0,01 | 1,84 | 1,80 | 2,09 | 1,92±0,16 |
| br | 23,81 | 44,7±5,3 | 49,0±2,6 | 44,7±1,8 | 41,4±1,8 | 43,6±1,9 | 49,6±4,7 | 43,1±2,3 | 49,9±3,9 | 47,7±2,1 | 47,1 | 55,6 | 61,1 | 48,9±1,1 |
| B | 0,62 | 1,01±0,10 | 1,08±0,05 | 0,99±0,02 | 0,92±0,02 | 0,99±0,03 | 0,93±0,04 | 0,90±0,02 | 0,99±0,08 | 0,91±0,02 | 0,84 | 1,00 | 1,00 | 0,87±0,02 |
| Кол-во экз. | 1 | 5 | 10 | 21 | 22 | 22 | 22 | 7 | 3 | 6 | 1 | 1 | 1 | 2 |
| Оз. Куэтъярви, малотычинковый сиг | | | | | | | | | | | | | | |
| J | - | 1,40±0,17 | 1,43±0,05 | 1,56±0,04 | 1,64±0,03 | 1,68±0,04 | 1,81±0,04 | 1,91±0,12 | 1,80±0,04 | 1,77±0,23 | 1,81 | - | - | - |
| br | - | 43,9±3,0 | 43,8±1,2 | 46,9±0,7 | 49,7±0,6 | 52,2±0,9 | 52,8±0,9 | 57,7±1,3 | 52,0±0,01 | 53,5±5,1 | 56,7 | - | - | - |
| B | - | 1,03±0,11 | 0,98±0,03 | 0,98±0,02 | 0,96±0,02 | 0,98±0,03 | 0,97±0,03 | 1,03±0,11 | 0,95±0,03 | 1,05±0,08 | 1,00 | - | - | - |
| Кол-во экз. | - | 4 | 15 | 38 | 47 | 24 | 9 | 4 | 2 | 2 | 1 | - | - | - |
| Оз. Куэтъярви, среднетычинковый сиг | | | | | | | | | | | | | | |
| J | - | 1,37±0,04 | 1,45±0,02 | 1,58±0,03 | 1,64±0,03 | 1,68±0,03 | 1,75±0,07 | 1,67±0,10 | - | - | - | - | - | - |
| br | - | 42,1±0,7 | 44,6±0,5 | 47,0±0,6 | 48,0±0,6 | 49,3±0,6 | 52,4±1,7 | 52,8±4,5 | - | - | - | - | - | - |
| B | - | 0,95±0,03 | 1,00±0,02 | 0,96±0,02 | 0,98±0,02 | 0,97±0,02 | 0,94±0,04 | 0,91±0,03 | - | - | - | - | - | - |
| Кол-во экз. | - | 41 | 76 | 57 | 46 | 48 | 5 | 3 | - | - | - | - | - | - |

Примечание. Здесь и в табл. 3 приведены средние значения и их ошибка.

Таблица 3. Изменение величины передней, переднего диагонального, бокового и заднего радиусов чешуи относительно длины тела (АС), %, с возрастом у сига *Coregonus lavaretus* оз. Имандра и водоемов системы р. Пасвик, 2011–2013 гг.

| Радиус чешуи | Возраст, лет | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------|------|------|-------------|
| | 0+ | 1+ | 2+ | 3+ | 4+ | 5+ | 6+ | 7+ | 8+ | 9+ | 10+ | 11+ | 12+ | 14+ |
| Оз. Имандра, малотычинковый сиг | | | | | | | | | | | | | | |
| Передний | 0,61 ± 0,01 | 0,62 ± 0,03 | 0,78 ± 0,03 | 0,85 ± 0,01 | 0,89 ± 0,01 | 0,94 ± 0,01 | 1,01 ± 0,02 | 1,07 ± 0,04 | 1,07 ± 0,21 | 0,91 | - | - | - | - |
| Передний диагональный | 0,69 ± 0,01 | 0,77 ± 0,03 | 0,85 ± 0,02 | 0,92 ± 0,01 | 0,97 ± 0,01 | 1,01 ± 0,01 | 1,07 ± 0,02 | 1,14 ± 0,03 | 1,15 ± 0,16 | 1,02 | - | - | - | - |
| Боковой | 0,74 ± 0,03 | 0,74 ± 0,02 | 0,78 ± 0,01 | 0,83 ± 0,01 | 0,84 ± 0,01 | 0,85 ± 0,01 | 0,88 ± 0,01 | 0,91 ± 0,02 | 0,99 ± 0,06 | 0,89 | - | - | - | - |
| Задний | 0,95 ± 0,02 | 0,78 ± 0,02 | 0,80 ± 0,01 | 0,78 ± 0,01 | 0,77 ± 0,01 | 0,78 ± 0,01 | 0,75 ± 0,01 | 0,73 ± 0,02 | 0,77 ± 0,07 | 0,80 | - | - | - | - |
| Кол-во экз. | 2 | 19 | 45 | 137 | 207 | 135 | 64 | 22 | 2 | 1 | - | - | - | - |
| Оз. Куэтъярви, малотычинковый сиг | | | | | | | | | | | | | | |
| Передний | - | 0,63 ± 0,12 | 0,63 ± 0,03 | 0,73 ± 0,02 | 0,82 ± 0,02 | 0,88 ± 0,03 | 0,96 ± 0,03 | 1,11 ± 0,09 | 0,94 ± 0,02 | 0,96 ± 0,21 | 1,03 | - | - | - |
| Передний диагональный | - | 0,71 ± 0,09 | 0,76 ± 0,04 | 0,86 ± 0,02 | 0,94 ± 0,02 | 1,00 ± 0,03 | 1,07 ± 0,04 | 1,26 ± 0,08 | 1,09 ± 0,05 | 0,99 ± 0,15 | 1,12 | - | - | - |
| Боковой | - | 0,69 ± 0,02 | 0,74 ± 0,03 | 0,80 ± 0,02 | 0,86 ± 0,02 | 0,87 ± 0,02 | 0,94 ± 0,02 | 0,94 ± 0,06 | 0,94 ± 0,01 | 0,84 ± 0,05 | 0,91 | - | - | - |
| Задний | - | 0,77 ± 0,05 | 0,80 ± 0,03 | 0,82 ± 0,02 | 0,82 ± 0,02 | 0,80 ± 0,01 | 0,85 ± 0,02 | 0,80 ± 0,03 | 0,85 ± 0,02 | 0,81 ± 0,02 | 0,79 | - | - | - |
| Кол-во экз. | - | 4 | 15 | 38 | 47 | 24 | 9 | 4 | 2 | 2 | 1 | - | - | - |
| Оз. Куэтъярви, среднетычинковый сиг | | | | | | | | | | | | | | |
| Передний | - | 0,58 ± 0,02 | 0,64 ± 0,02 | 0,75 ± 0,02 | 0,79 ± 0,02 | 0,83 ± 0,02 | 0,92 ± 0,05 | 0,89 ± 0,13 | - | - | - | - | - | - |
| Передний диагональный | - | 0,72 ± 0,01 | 0,76 ± 0,01 | 0,87 ± 0,01 | 0,91 ± 0,02 | 0,96 ± 0,02 | 1,06 ± 0,04 | 1,07 ± 0,13 | - | - | - | - | - | - |
| Боковой | - | 0,73 ± 0,02 | 0,73 ± 0,01 | 0,82 ± 0,01 | 0,84 ± 0,02 | 0,87 ± 0,01 | 0,94 ± 0,03 | 0,92 ± 0,09 | - | - | - | - | - | - |
| Задний | - | 0,79 ± 0,02 | 0,80 ± 0,02 | 0,83 ± 0,01 | 0,85 ± 0,01 | 0,85 ± 0,01 | 0,83 ± 0,04 | 0,78 ± 0,03 | - | - | - | - | - | - |
| Кол-во экз. | - | 41 | 76 | 57 | 46 | 48 | 5 | 3 | - | - | - | - | - | - |
| Оз. Виртуовошьяр, малотычинковый сиг | | | | | | | | | | | | | | |
| Передний | 0,52 | 0,68 ± 0,08 | 0,73 ± 0,02 | 0,68 ± 0,04 | 0,68 ± 0,04 | 0,64 ± 0,03 | 0,90 ± 0,09 | 0,74 ± 0,06 | 0,90 ± 0,06 | 0,91 ± 0,08 | 1,03 | 1,00 | 1,28 | 1,08 ± 0,09 |
| Передний диагональный | 1,13 | 0,78 ± 0,06 | 0,85 ± 0,03 | 0,82 ± 0,03 | 0,82 ± 0,03 | 0,82 ± 0,04 | 1,04 ± 0,04 | 0,93 ± 0,04 | 0,97 ± 0,05 | 1,07 ± 0,07 | 1,19 | 1,07 | 1,45 | 1,24 ± 0,09 |
| Боковой | 1,08 | 0,78 ± 0,07 | 0,76 ± 0,04 | 0,76 ± 0,02 | 0,76 ± 0,02 | 0,77 ± 0,02 | 0,91 ± 0,02 | 0,85 ± 0,02 | 0,90 ± 0,03 | 0,95 ± 0,04 | 1,10 | 0,90 | 1,04 | 1,10 ± 0,12 |
| Задний | 0,82 | 0,86 ± 0,05 | 0,88 ± 0,02 | 0,81 ± 0,02 | 0,81 ± 0,02 | 0,77 ± 0,02 | 0,78 ± 0,02 | 0,80 ± 0,02 | 0,89 ± 0,05 | 0,82 ± 0,03 | 0,81 | 0,80 | 0,81 | 0,84 ± 0,07 |
| Кол-во экз. | 1 | 5 | 10 | 21 | 22 | 22 | 22 | 7 | 3 | 6 | 1 | 1 | 1 | 2 |

Таблица 4. Коэффициенты детерминации (R^2), определяющие линейную и степенную зависимость между длиной тела (AC), мм, и размерами чешуи, ед. ок.-микрометра по различным радиусам чешуи, и коэффициенты регрессии при степенной зависимости (a , b) между длиной тела (AC), мм, и размерами чешуи, ед. ок.-микрометра по различным радиусам чешуи, у малотычинкового сига плеса Йокостровская Имандра оз. Имандра, 2013 г.

| Радиусы | R^2 при линейной зависимости | R^2 при степенной зависимости | Коэффициенты регрессии при степенной зависимости, a / b | Кол-во экз. |
|-----------------------|--------------------------------|---------------------------------|---|-------------|
| Передний | 0,93 | 0,94 | 36,22 / 0,62 | 26 |
| Передний диагональный | 0,90 | 0,93 | 36,26 / 0,62 | 26 |
| Боковой | 0,90 | 0,92 | 28,20 / 0,71 | 26 |
| Задний | 0,72 | 0,77 | 14,51 / 0,96 | 26 |

Таблица 5. Расчисленная длина (AC), мм, по четырем радиусам чешуи и наблюдаемая длина (AC), мм, у малотычинкового сига плеса Йокостровская Имандра оз. Имандра, 2013 г.

| Возраст, годы, лет | Расчисленная длина, мм, по четырем радиусам чешуи | | | | Наблюдаемая длина, мм | |
|--------------------|---|-----------------------|----------------|----------------|-----------------------|-----------------------|
| | Передний | Передний диагональный | Боковой | Задний | - | Со смещением на 1 год |
| 1 | 108 ± 2,5 (26) | 115 ± 2,4 (26) | 115 ± 2,4 (26) | 105 ± 2,7 (26) | 146 ± 1,9 (4) | 116 ± 2,5 (2) |
| 2 | 149 ± 4,4 (22) | 154 ± 4,4 (22) | 158 ± 3,9 (22) | 156 ± 3,4 (22) | 185 ± 3,3 (4) | 146 ± 1,9 (4) |
| 3 | 179 ± 7,1 (18) | 185 ± 6,0 (18) | 191 ± 5,5 (18) | 194 ± 6,3 (18) | 246 ± 7,8 (4) | 185 ± 3,3 (4) |
| 4 | 200 ± 6,3 (14) | 206 ± 4,7 (14) | 211 ± 4,7 (14) | 220 ± 5,9 (14) | 256 ± 1,2 (3) | 246 ± 7,8 (4) |
| 5 | 233 ± 6,4 (11) | 236 ± 5,1 (11) | 242 ± 5,3 (11) | 248 ± 6,5 (11) | 275 ± 2,9 (3) | 256 ± 1,2 (3) |
| 6 | 262 ± 4,5 (8) | 268 ± 5,3 (8) | 270 ± 6,6 (8) | 273 ± 7,7 (8) | 280 ± 1,8 (4) | 275 ± 2,9 (3) |
| 7 | 295 ± 6,7 (4) | 296 ± 6,7 (4) | 302 ± 6,8 (4) | 299 ± 8,9 (4) | 316 ± 15,5 (2) | 280 ± 1,8 (4) |
| 8 | 308 ± 3,3 (2) | 316 ± 4,4 (2) | 326 ± 10,9 (2) | 318 ± 16,1 (2) | 323 (1) | 316 ± 15,5 (2) |
| 9 | 330 (1) | 338 (1) | 353 (1) | 347 (1) | 361 (1) | 323 (1) |

Примечание. В таблице приведены средние значения и их ошибка, в скобках представлено кол-во экз.; в последнем столбике значение 116 ± 2,5 мм – длина (AC) сеголетков сига (0+ лет), выловленных в плесе Йокостровская Имандра оз. Имандра в сентябре 2013 г.

19 до 30 (25 ± 0,2), в оз. Куэтсъярви – двумя формами: малотычинковой и среднетычинковой с числом тычинок на первой жаберной дуге соответственно от 14 до 33 (24 ± 0,3) и от 27 до 39 (33 ± 0,2).

Малотычинковый сиг в оз. Имандра был представлен особями в возрасте от 0+ до 9+ лет, в оз. Виртуовошъяур – от 0+ до 14+ лет. В оз. Куэтсъярви малотычинковый сиг – от 1+ до 10+ лет, среднетычинковый – от 1+ до 7+ лет.

Морфология чешуи и закономерности ее размерно-возрастных изменений у различных форм сига исследуемых водоемов не различались (рис. 2, а, б). Чешуя исследуемых рыб типичная циклоидная, центральный склерит имеет овальную форму, чаще незамкнут. Склериты имеются на всей поверхности чешуи – они образуют чередующиеся комплексы из «концентрических» и следующих за ними «выклинивающихся» («срезанных») склеритов, которые формируют годовые зоны роста. Выклинивание склеритов начинается на границе бокового и заднего секторов чешуи и заканчивается на переднем секторе, поэтому здесь их большее число, что указывает на закладку и более

интенсивный их рост в базальной части с вершины чешуи [Галкин, 1958]. В переднем секторе наблюдается удвоение склеритов (рис. 2, в), склериты здесь слабоволнистые. Вдоль боковых секторов чешуи в результате утери склеритов расстояние между ними незначительно больше; гораздо большие расстояния наблюдаются между склеритами в заднем секторе, что объясняется дополнительной «потерей» некоторых склеритов на границе бокового и заднего секторов чешуи, они как бы обрываются (рис. 2, г).

Относительный размер чешуи (J) у рыб значимо увеличивается с возрастом, при этом центр чешуи (br) сдвигается к заднему краю ($P > 0,01$) (табл. 2). Эти изменения происходят из-за различного роста переднего и заднего секторов чешуи сига в разном возрасте: передний сектор чешуи, включающий передний и передний диагональный радиусы относительно длины тела, с возрастом увеличивается; задний сектор – практически не изменяется (табл. 3). Боковой сектор чешуи сига, включающий боковой радиус, с возрастом относительно длины тела увеличивается ($P > 0,01$). Форма чешуи (B) сига исследуемых водоемов остается постоянной (табл. 2).

тела (L) и размерами чешуи (R) [Чугунова, 1959; Брюзгин, 1969; Мина, 1981]. У малотычинкового сига Йокостровской Имандры зависимость между длиной тела и различными радиусами чешуи лучше описывается уравнением степенной функции, нежели линейной (табл. 4), но при разных значениях параметров линии регрессии (коэффициентов регрессии a и b) (табл. 4). Чтобы выяснить, в какой мере различия линий регрессии влияют на оценки расчисленной длины, мы сравнили расчисленные по разным радиусам оценки для одних и тех же особей. Линии регрессии длины по четырем радиусам чешуи не проходят через начало координат, поэтому для обратных расчислений длины рыб предпочтительнее использовать формулу Розы Ли [Брюзгин, 1969; Мина, 1981]. Для обратных расчислений длины малотычинкового сига мы логарифмировали уравнение степенной функции $L = a \times R^b$, получали: $\ln L = \ln a + b \times \ln R$. Расчисляли по Ли, но вместо абсолютных значений переменных брали их логарифмы: $\ln L_i = \ln a + \ln R_i / \ln R_n \times (\ln L_n - \ln a)$, где R_n – радиус чешуи данной рыбы в момент ее поимки, R_i – радиус чешуи этой особи в возрасте i лет, L_n – длина рыбы в момент поимки, L_i – длина рыбы в возрасте i лет, a – постоянная величина.

Наши результаты показали, что любой радиус чешуи может быть выбран для обратных расчислений длины сига, так как расчисленные длины по четырем радиусам на протяжении жизни значимо не различались (табл. 5). Также сравнение расчисленных оценок длины с фактическими показало, что они одинаково хорошо соответствуют по всем радиусам чешуи, но со смещением на 1 год, так как вылов исследуемых 26 экземпляров сига из Йокостровской Имандры происходил с октября по март, когда новый прирост практически завершен, но еще не сформировалось новое годовое кольцо. Из этого следует, что при сравнении фактических величин длины рыб с расчисленными надо строго учитывать сезон лова рыбы.

У сига всех возрастов число годовых колец одно и то же по разным радиусам чешуи. Для обратных расчислений длины сига исследуемых водоемов нами рекомендуется снимать размер годовых колец с переднего диагонального радиуса чешуи. Анализ структуры чешуи показал, что по этому радиусу возможно более четкое фиксирование годовых колец у исследуемых рыб.

Установлено, что у исследуемых сига оз. Имандра и водоемов системы реки Пасвик зависимость между длиной тела и передним диагональным радиусом хорошо описывается уравнением как степенной, так

и линейной функции (рис. 3, а–г). Отсюда находим формулу для обратного расчисления длины малотычинкового сига оз. Имандра: $\ln L_i = \ln 46,13 + (\ln L_n - \ln 46,13) \times (\ln R_i / \ln R_n)$, для малотычинкового сига оз. Виртуовошьяур: $\ln L_i = \ln 37,0 + (\ln L_n - \ln 37,0) \times (\ln R_i / \ln R_n)$ и для малотычинкового и среднетычинкового сига оз. Куэтсьярви соответственно: $L_i = 71,47 + R_i / R_n \times (L_n - 71,47)$ и $\ln L_i = \ln 25,58 + \ln R_i / \ln R_n \times (\ln L_n - \ln 25,58)$. Учитывая время лова, мы соотнесли фактическую длину сига с расчисленной длиной. Результаты сравнения представлены на рисунке 3 (д–з), где видно, что у сига фактическая оценка длины хорошо соответствует расчисленной.

Выводы

Не выявлено различий в морфологии и размерно-возрастных изменениях чешуи различных форм сига исследуемых водоемов. Показано, что в течение жизни у исследуемых рыб относительный рост различных секторов данной минерализованной структуры неодинаков: передний и боковой секторы чешуи увеличиваются с возрастом, задний сектор – уменьшается; форма чешуи остается постоянной.

Для обратных расчислений длины (АС) сига может быть использован любой радиус чешуи. Рекомендуется снимать размеры годовых колец с переднего диагонального радиуса чешуи. У исследуемых сига зависимость между длиной тела и передним диагональным радиусом одинаково хорошо описывается уравнением как степенной, так и линейной функции. Предпочтительно использовать для обратных расчислений длины рыб формулу Розы Ли.

Авторы выражают благодарность сотрудникам лаборатории водных экосистем ИП-ПЭС КНЦ РАН за помощь в проведении экспедиционных работ. Особая благодарность – д. б. н. М. В. Мине (ИБР РАН) за участие в обсуждении полученных авторами результатов.

Литература

- Брюзгин В. Л. Методы изучения роста рыб по чешуе, костям и отолитам. Киев: Наукова думка, 1969. 188 с.
- Галкин Г. Г. Атлас чешуи пресноводных костистых рыб // Изв. ВНИИ озер. и реч. рыб. хоз-ва. 1958. Т. 46. 105 с.
- Вовк Ф. И. О методике реконструкции роста рыб по чешуе // Сб. тр. биол. ст. «Борок» АН СССР. 1956. № 2. С. 351–392.
- Заварзина Н. К. О методике определения возраста и размерно-возрастных особенностях

малоротых корюшек рода *Hypomesus* острова Сахалин // Чтения памяти В. Я. Леванидова. 2005. №. 3. С. 587–593.

Зиновьев Е. А. Экология и систематика хариусовых рыб Евразии: автореф. дис. ... докт. биол. наук. Пермь: ПермГУ, 2004. 20 с.

Зиновьев Е. А., Мандрица С. А. Методы исследования пресноводных рыб. Пермь: ПермГУ, 2003. 113 с.

Зубова Е. М. Линейный рост европейского сига *Coregonus lavaretus* (L.) в антропогенно-модифицированных водоемах европейской Субарктики (на примере Мурманской области): автореф. дис. ... канд. биол. наук. Пермь: ПГНИУ, 2015. 28 с.

Зубова Е. М., Кашулин Н. А., Терентьев П. М. Линейный рост малотычинкового сига *Coregonus lavaretus lavaretus* (L.) (Coregonidae) Бабинской Имандры (оз. Имандра) // Биология внутренних вод. 2015. № 1. С. 81–92.

Кашулин Н. А. Теоретические основы ихтиологической биоиндикации загрязнения водоемов тяжелыми металлами: дис. ... докт. биол. наук. Апатиты: КНЦ РАН, 1999. 382 с.

Кашулин Н. А. Рыбы малых озер Северной Феноскандии в условиях аэротехногенного загрязнения. Апатиты: КНЦ РАН, 2004. 130 с.

Кашулин Н. А., Лукин А. А., Амундсен П. А. Рыбы пресноводных вод Субарктики как биоиндикаторы техногенного загрязнения. Апатиты: КНЦ РАН, 1999. 142 с.

Кузнецова Е. Н. Рост рыб и стратегии их жизненных циклов: дис. ... докт. биол. наук. М.: ВНИРО, 2003. 330 с.

Никольский Г. В. Теория динамики стада рыб. М.: Пищ. промышл., 1974. 447 с.

Мина М. В. Рост рыб (методы исследования в природных популяциях). Рост животных. М.: ВНИТИ, 1973. С. 68–115.

Мина М. В. Задачи и методы изучения рыб в природных условиях. Современные проблемы ихтиологии. М.: Наука, 1981. С. 177–195.

Мина М. В., Клевезаль Г. А. Рост животных. М.: Наука, 1976. 291 с.

Моисеенко Т. И. Закисление и загрязнение тяжелыми металлами поверхностных вод Кольского Севера. Апатиты: КНЦ РАН, 1991. 47 с.

Моисеенко Т. И. Теоретические основы нормирования антропогенных нагрузок на водоемы Субарктики. Апатиты: КНЦ РАН, 1997. 261 с.

Моисеенко Т. И. Морфофизиологические перестройки организма рыб под влиянием загрязнения (в свете теории Шварца) // Экология. 2000. № 6. С. 463–472.

Моисеенко Т. И. Изменение стратегии жизненного цикла рыб под воздействием хронического загрязнения вод // Экология. 2002. № 1. С. 50–60.

Правдин И. Ф. Руководство по изучению рыб. М.: Пищ. промышл., 1966. 376 с.

Решетников Ю. С. Особенности роста и созревания сигов в водоемах Севера. Закономерности динамики численности рыб Белого моря и его бассейна. М.: Наука, 1966. С. 93–155.

Решетников Ю. С. Экология и систематика сиговых рыб. М.: Наука, 1980. 301 с.

Тягун М. Л. Изучение структуры и роста чешуи байкальского омуля (*Coregonus autumnalis migratorus* Georgi): автореф. дис. ... канд. биол. наук. Петрозаводск: Лимнол. ин-т СО РАН, 2004. 26 с.

Черешнев И. А., Скопец М. Б. Новые данные по биологии омуля *Coregonus subautumnalis* бассейна реки Пенжина // Вопросы ихтиологии. 1992. Т. 32, № 2. С. 42–52.

Шарова Ю. Г., Лукин А. А. Система воспроизводства сига *Coregonus lavaretus* в условиях многофакторного загрязнения // Вопр. ихтиологии. 2000. Т. 40, № 3. С. 425–428.

Kahilainen K., Lehtonen H., Könönen K. Consequence of habitat segregation to growth rate of two sparsely rakered whitefish (*Coregonus lavaretus* (L.)) forms in a subarctic lake // Ecology of freshwater fish. 2003. No. 12. P. 275–285.

Поступила в редакцию 12.05.2016

References

Brjuzgin V. L. Metody izuchenija rosta ryb po cheshue, kostjam i otolitham [Methods of fish growth study based on scales, bones and otoliths]. Kiev: Naukova Dumka, 1969. 188 p.

Galkin G. G. Atlas cheshui presnovodnyh kostistyh ryb [Atlas of scales of freshwater bony fishes]. *Izv. Vses. Nil ozer. i rech. ryb. hoz-va* [Trans. of All-Union Res. Institute of Lake and River Fisheries]. 1958. Vol. 46. 105 p.

Vovk F. I. O metodike rekonstrukcii ryb po cheshue [On the scale-based reconstruction of fish]. *Cb. tr. biol. st. «Borok» AN SSSR* [Proceedings of the Borok Biol. Research Station of the USSR Academy of Sciences]. 1956. No. 2. P. 351–392.

Zavarzina N. K. O metodike opredelenija vozrasta i razmerno-vozzratsnyh osobennostyah malorotyh korjushek roda *Hypomesus* ostrova Sahalin [On the method of determining the age and size/age features of smelt

of the genus *Hypomesus* on Sakhalin Island]. *Chthenija pamjati V. Ja. Levanidova* [Readings in Memoriam of V. Ja. Levanidova]. 2005. No. 3. P. 587–593.

Zinov'ev E. A. Jekologija i sistematika hariusovyh ryb Evrazii [Ecology and systematics of Eurasian Thymallidae]: DSc (Dr. of Biol.) thesis. Perm': PermGU, 2004. 20 p.

Zinov'ev E. A., Mandrica S. A. Metody issledovanija presnovodnyh ryb [Methods of freshwater fish studies]. Perm': PermGU, 2003. 113 p.

Zubova E. M. Linejnyj rost evropejskogo siga *Coregonus lavaretus* (L.) v antropogenno-modificirovannyh vodoemah evropejskoj subarktiki (na primere Murmanskoj oblasti) [Linear growth in the European whitefish, *Coregonus lavaretus* (L.), in disturbed waters of the European Subarctic region (the case of the Murmansk Region)]: Summary of PhD (Cand. of Biol.) thesis. Perm': PGNIU, 2015. 28 p.

Zubova E. M., Kashulin N. A., Terent'ev P. M. Linejnij rost malotyčinkovogo siga *Coregonus lavaretus lavaretus* (L.) (Coregonidae) Babinskoj Imandry (oz. Imandra) [Linear growth in the sparsely rakered whitefish, *Coregonus lavaretus lavaretus* (L.) (Coregonidae), in the Babinskaya Imandra (Lake Imandra)]. *Biologija vnutrennih vod* [Inland Water Biology]. 2015. No. 1. P. 81–92.

Kashulin N. A. Teoreticheskie osnovy ihtiologicheskoy bioindikacii zagrjaznenija vodoemov tjazhelymi metallami [Theoretical basis of the ichthyological bioindication of heavy metal pollution in waters]: DSc (Dr. of Biol.) thesis. Apatity: KSC RAS, 1999. 382 p.

Kashulin N. A. Ryby malyh ozer Severnoj Fennoskandii v uslovijah ajerrotehnogennogo zagrjaznenija [Fish of small lakes of Northern Fennoscandia under airborne pollution]. Apatity: KSC RAS, 2004. 130 p.

Kashulin N. A., Lukin A. A., Amundsen P. A. Ryby presnovodnyh vod Subarktiki kak bioindikatory tehnogennogo zagrjaznenija [Fish of Subarctic freshwater ecosystems as bioindicators of industrial pollution]. Apatity: KSC RAS, 1999. 142 p.

Kuznecova E. N. Rost ryb i strategii ih zhiznennyh ciklov [Fish growth and life cycles strategies]: DSc (Dr. of Biol.) thesis. Moscow: VNIRO, 2003. 330 p.

Nikol'skij G. V. Teorija dinamiki stada ryb [The theory of fish shoal dynamics]. Moscow: Pishh. promyshl., 1974. 447 p.

Mina M. V. Rost ryb (metody issledovanija v prirodnyh populacijah) [Fish growth (research methods in natural populations)]. Rost zhivotnyh [Animal growth]. Moscow: VINITI, 1973. P. 68–115.

Mina M. V. Zadachi i metody izuchenija ryb v prirodnyh uslovijah [Tasks and methods of studying fish under natural conditions]. Sovremennye problemy ihtiologii [Topical Problems of Ichthyology]. Moscow: Nauka, 1981. P. 177–195.

Mina M. V., Klevezal' G. A. Rost zhivotnyh [Animal growth]. Moscow: Nauka, 1976. 291 p.

Moiseenko T. I. Zakislenie i zagrjaznenie tjazhelymi metallami poverhnostnyh vod Kol'skogo Severa [Acidification and heavy metal contamination of the Kola North surface waters]. Apatity: KSC RAS, 1991. 47 p.

Moiseenko T. I. Teoreticheskie osnovy normirovanija antropogennyh nagruzok na vodoemy Subarktiki: monografija [Theoretical basis of threshold value setting for human pressure on Subarctic waters]. Apatity: KSC RAS, 1997. 261 p.

Moiseenko T. I. Morfofiziologicheskie perestrojki organizma ryb pod vlijaniem zagrjaznenija (v svete teorii Shvarca) [Morphophysiological changes of fish under contamination (after Schwartz's theory)]. *Jekologija* [Ecology]. 2000. No. 6. P. 463–472.

Moiseenko T. I. Izmenenie strategii zhiznennogo cikla ryb pod vozdejstviem hronicheskogo zagrjaznenija vod [Modification of the fish life cycle strategy under the impact of chronic water pollution]. *Jekologija* [Ecology]. 2002. No. 1. P. 50–60.

Pravdin I. F. Rukovodstvo po izucheniju ryb [Guidelines on fish studies]. Moscow: Pishh. promyshl., 1966. 376 p.

Reshetnikov Ju. S. Osobennosti rosta i sozrevanija sigov v vodoemah Severa [Features of growth and maturation of whitefishes in waters of the North]. Zakonomernosti dinamiki chislennosti ryb Belogo morja i ego bassejna [Some patterns of fish abundance dynamics in the White Sea and its Drainage Basin]. Moscow: Nauka, 1966. P. 93–155.

Reshetnikov Ju. S. Jekologija i sistematika sigovyh ryb [Ecology and systematics of whitefishes]. Moscow: Nauka, 1980. 301 p.

Tjagun M. L. Izučenie struktury i rosta cheshui bajkal'skogo omulja (*Coregonus autumnalis migratorius* Georgi) [The study of scales structure and growth in the Baikal cisco (*Coregonus autumnalis migratorius* Georgi)]: Summary of PhD (Cand. of Biol.) thesis. Petrozavodsk: Limnol. in-t SO RAN, 2004. 26 p.

Chereshnev I. A., Skopec M. B. Novye dannye po biologii omulja *Coregonus subautumnalis* bassejna reki Penzhina [New data on the biology of the omul, *Coregonus subautumnalis*, of the Penzhina river catchment]. *Voprosy ihtiologii* [Journal of Ichthyology]. 1992. Vol. 32, no. 2. P. 42–52.

Sharova Ju. G., Lukin A. A. Sistema vosproizvodstva siga *Coregonus lavaretus* v uslovijah mnogofaktornogo zagrjaznenija [The reproduction system of the whitefish, *Coregonus lavaretus*, under multivariate pollution]. *Vopr. Ihtiologii* [Journal of Ichthyology]. 2000. Vol. 40, no. 3. P. 425–428.

Kahilainen K., Lehtonen H., Könönen K. Consequence of habitat segregation to growth rate of two sparsely rakered whitefish (*Coregonus lavaretus* (L.)) forms in a subarctic lake. *Ecology of freshwater fish*. 2003. No. 12. P. 275–285.

Received May 12, 2016

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Зубова Елена Михайловна

научный сотрудник, к. б. н.
Институт проблем промышленной экологии Севера
Кольского научного центра РАН
мкр. Академгородок, 14а, Апатиты, Мурманская область,
Россия, 184209
эл. почта: seelewolf84@yandex.ru

CONTRIBUTORS:

Zubova, Elena

Institute of Industrial Ecology Problems of the North,
Kola Science Center, Russian Academy of Sciences
14A Akademgorodok, 184209 Apatity, Murmansk Region,
Russia
e-mail: seelewolf84@yandex.ru

Кашулин Николай Александрович

зав. лабораторией, д. б. н.
Институт проблем промышленной экологии Севера
Кольского научного центра РАН
мкр. Академгородок, 14а, Апатиты, Мурманская область,
Россия, 184209
эл. почта: nikolay@inep.ksc.ru

Терентьев Петр Михайлович

старший научный сотрудник, к. б. н.
Институт проблем промышленной экологии Севера
Кольского научного центра РАН
мкр. Академгородок, 14а, Апатиты, Мурманская область,
Россия, 184209
эл. почта: p_terentjev@inep.ksc.ru

Kashulin, Nikolai

Institute of Industrial Ecology Problems of the North,
Kola Science Center, Russian Academy of Sciences
14A Akademgorodok, 184209 Apatity, Murmansk Region,
Russia
e-mail: nikolay@inep.ksc.ru

Terentjev, Pyotr

Institute of Industrial Ecology Problems of the North,
Kola Science Center, Russian Academy of Sciences
14A Akademgorodok, 184209 Apatity, Murmansk Region,
Russia
e-mail: p_terentjev@inep.ksc.ru

УДК 556.555.43

ОЦЕНКА КРИТИЧЕСКИХ ЗНАЧЕНИЙ ПЕРВИЧНОЙ ПРОДУКЦИИ ВОДОЕМОВ ПРИ ПОЯВЛЕНИИ АНОКСИИ В ГИПОЛИМНИОНЕ

Ю. С. Даценко

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова

Основанный на балансовом подходе расчет минимальной концентрации кислорода в гипolimнионе озер применен для оценки уровня продукционных процессов, соответствующего появлению аноксии в гипolimнионе озер. По данным регулярных наблюдений за режимом растворенного кислорода в 16 водоемах мира получены линейные регрессионные зависимости величины годовой первичной продукции, при которой может наблюдаться аноксия в гипolimнионе водоема. Установлена обратная линейная зависимость критической первичной продукции с коэффициентом формы озер, проверенная на независимом материале наблюдений за кислородным режимом озер.

Ключевые слова: скорость потребления кислорода; гипolimнион; аноксия; первичная продукция; коэффициент формы озера.

Yu. S. Datsenko. ESTIMATION OF THE CRITICAL VALUE OF A WATER BODY'S PRIMARY PRODUCTION FOR ANOXIC ZONE EMERGENCE

Calculation of the minimum oxygen concentration in the hypolimnion of lakes based on the balance approach was used to estimate the level of production processes corresponding to the emergence of anoxia in the hypolimnion. Data from regular monitoring of the dissolved oxygen regime in 16 lakes and reservoirs of the world were processed to obtain the linear regression relationships of annual primary production values at which anoxia may appear in the hypolimnion of a lake. An inverse linear dependence of the critical primary production on the lake's shape factor was established and tested using data from independent observations of the oxygen regime in lakes.

Keywords: oxygen consumption rate; hypolimnion; anoxia; primary production; the shape factor of a lake.

Содержание и распределение в воде водоема растворенного кислорода в каждый отдельный момент времени интегрально отражает особенности тесно взаимосвязанных гидродинамических и биохимических процессов. Поэтому относительно легко измеряемое содержание растворенного кислорода в воде служит важной информацией при оценке состояния экосистемы и процессов эвтрофирования водоема.

Изменчивость содержания кислорода по вертикали резко усиливается в стратифицированных водоемах, когда в результате вертикального плотностного расслоения ограничивается процесс массообмена между слоями. Возникающая вертикальная стратификация концентрации кислорода может служить эффективным индикатором продуктивности, а следовательно, трофического состояния

экосистемы. Эта особенность режима кислорода в водоемах обусловила давний и глубокий интерес лимнологов к характеристикам его вертикального распределения.

В глубинных слоях содержание кислорода с течением времени постоянно уменьшается в результате его расходования на окисление поступающего сюда в процессе седиментации органического вещества. Поскольку скорость потребления кислорода в гипolimнионе (ПКГ) зависит от количества поступающего в этот слой органического вещества, следовательно, от интенсивности продукционных процессов в водоеме, то она может служить индикатором трофического состояния водоема. Информативность такого показателя зависит от степени стратифицированности водоема, которая представляется функцией главным образом динамических и морфометрических характеристик водоема. Впервые критерии оценки трофического состояния водоемов по скорости ПКГ были предложены Д. Э. Хатчинсоном [Hutchinson, 1938].

Определение величины ПКГ в водоемах, основанное на измерении концентрации кислорода в гипolimнионе через определенные промежутки времени, включает несколько предположений: 1) потребление кислорода в гипolimнионе происходит линейно, т. е. не зависит от концентрации самого кислорода, 2) толщина гипolimниона остается постоянной в течение периода измерений, 3) обмен кислородом с эпилимнионом, а также горизонтальная адвекция кислорода отсутствуют. Обоснованность первого предположения была подтверждена Р. Корнетом и Ф. Риглером путем специальных исследований в озерах [Cornett, Rigler, 1979]. Изменение концентрации кислорода в гипolimнионе уменьшалось линейно, при этом величина потребления кислорода в водной толще не обнаружила связи с величиной концентрации кислорода во всем диапазоне наблюдаемых концентраций вплоть до концентрации 0,3 мг/л. При меньших концентрациях процессы становятся анаэробными и линейность нарушается. В реальности толщина гипolimниона, особенно в относительно неглубоких водоемах, может варьировать в течение вегетационного периода значительно, так же как и подпитка кислородом из вышележащих слоев в результате эрозии термоклина, однако считается, что вклад этих факторов в общий процесс ПКГ невелик, и они не учитываются. Предположение о линейности процессов ПКГ позволило С. Чапра и Р. Канале предложить простую модель для его расчета в озе-

рах с учетом обмена кислородом между слоями [Chapra, Canale, 1991].

Изменение запаса растворенного кислорода в гипolimнионе может быть выражено так:

$$V_h \frac{dC_h}{dt} = E''(C_e - C_h) - V_h D_v, \quad (1)$$

где V_h , C_h и C_e – объем гипolimниона и концентрация кислорода в гипolimнионе и эпилимнионе соответственно, D_v – объемная скорость потребления кислорода (только под влиянием окисления), E'' – коэффициент объемной вертикальной диффузии, который может быть рассчитан из уравнения теплового баланса водоема в предположении о постоянстве температуры эпилимниона в период стратификации

$$E'' = \frac{V_h \ln \frac{T_{h,o} - \bar{T}_e}{T_{h,t} - \bar{T}_e}}{t_s}, \quad (2)$$

где $T_{h,o}$, $T_{h,t}$ – начальная и конечная за период стратификации (t_s) температура воды в гипolimнионе, \bar{T}_e – средняя за период стратификации температура воды в эпилимнионе.

Если концентрацию кислорода в эпилимнионе принять постоянной для расчетного периода \bar{C}_e , решение уравнения (1) может быть записано следующим образом:

$$C_{h,t} = C_{h,0} \exp\left(\frac{-E''}{V_h} t\right) + \left(\bar{C}_e - \frac{V_h D_v}{E''}\right) \left[1 - \exp\left(\frac{-E''}{V_h} t\right)\right]. \quad (3)$$

Это уравнение можно переписать для расчета скорости объемного потребления растворенного O_2 :

$$D_v = -\frac{E''}{V_h} \cdot \frac{C_{h,t} - C_{h,0} \exp\left(\frac{-E''}{V_h} t\right) - \bar{C}_e \left(1 - \exp\left(\frac{-E''}{V_h} t\right)\right)}{1 - \exp\left(\frac{-E''}{V_h} t\right)}. \quad (4)$$

Зависимость дефицита O_2 от продуктивности водоемов исследовалась многими лимнологами, но хотя механизм возникновения дефицита хорошо изучен, при расчетах практически всегда приходится делать следующее допущение. Предполагается, что скорость развития дефицита O_2 в эвтрофном озере определяется в основном величиной его продуктивности и зависит от толщины гипolimниона, т. к. дефицит кислорода есть результат гетеротрофной ассимиляции органического вещества, которое оседает из трофогенной зоны эпилимниона.

Таблица 1. Результаты расчетов критических величин первичной продукции (ПП), соответствующей анаэробным условиям в гипolimнионе озер

| Название водоема | Средняя глубина, м | Коэффициент формы | Зависимость для C_{min} | ПП, гС/ (м ² год) при $C_{min} = 0$ |
|----------------------------|--------------------|-------------------|---------------------------|--|
| оз. Бива (Япония) | 41,0 | 0,39 | -0,065ПП + 10,31 | 158,6 |
| оз. Окутаме (Япония) | 44,4 | 0,31 | -0,007ПП + 6,44 | 920,0 |
| оз. Сува (Япония) | 4,7 | 0,65 | -0,013ПП + 11,01 | 846,9 |
| оз. Кизаки (Япония) | 17,9 | 0,61 | -0,079ПП + 8,55 | 108,2 |
| оз. Огавара (Япония) | 11,2 | 0,45 | -0,012ПП + 8,58 | 715,0 |
| оз. Цюрихское (Швейцария) | 51,0 | 0,38 | -0,014ПП + 8,30 | 592,9 |
| оз. Лунзер (Австрия) | 20,0 | 0,59 | -0,066ПП + 11,92 | 180,6 |
| оз. Маларен (Швеция) | 11,9 | 0,20 | -0,018ПП + 10,32 | 611,0 |
| оз. Венерн (Швеция) | 27,0 | 0,25 | -0,12ПП + 10,80 | 900,0 |
| оз. Аммер (Германия) | 38,1 | 0,46 | -0,015ПП + 11,24 | 749,3 |
| оз. Штернбергер (Германия) | 53,2 | 0,42 | -0,062ПП + 11,70 | 188,7 |
| оз. Боденское (Швейцария) | 90,0 | 0,36 | -0,034ПП + 11,0 | 304,0 |
| вдхр. Можайское (Россия) | 7,6 | 0,39 | -0,020ПП + 9,47 | 473,5 |
| оз. Аннески (Франция) | 41,5 | 0,64 | -0,042ПП + 9,98 | 237,6 |
| оз. Вашингтон (США) | 32,9 | 0,50 | -0,021ПП + 11,33 | 539,5 |
| вдхр. Диллон (США) | 24,1 | 0,34 | -0,010ПП + 7,42 | 742,0 |

В первом приближении эта зависимость линейна и может быть представлена следующим образом:

$$D_a = \theta \cdot \alpha \cdot ПП, \quad (5)$$

где D_a – средняя скорость потребления O_2 в столбе под 1 м²; θ – коэффициент, характеризующий долю ОВ, которая окисляется в трофогенном слое, $\alpha = 0,029$ – коэффициент, характеризующий затраты на окисление единицы массы органических соединений, $ПП$ – величина годовой первичной продукции водоема. Таким образом, в этой модели пренебрегается притоком аллохтонного органического вещества.

Средняя скорость потребления O_2 в столбе под 1 м² связана с объемной скоростью потребления следующим образом:

$$D_a = z_h D_v \beta, \quad (6)$$

где z_h – средняя толщина гипolimниона и $\beta = 0,1$ – эмпирический коэффициент.

Тогда уравнения (3) и (5) могут быть объединены в одно для определения минимальной концентрации O_2 в гипolimнионе за период летней стратификации:

$$C_{min} = C_{h,0} \exp\left(\frac{-E''}{V_h} t_s\right) + \left(\bar{C}_e - \frac{V \theta \alpha ПП}{E'' z_h \beta}\right) \left(1 - \exp\left(\frac{-E''}{V_h} t_s\right)\right). \quad (7)$$

Эта модель позволяет получить зависимость величины минимальной концентрации

кислорода за период стратификации от средней за этот период величины первичной продукции. Приравнивая левую часть уравнения (7) к нулю, можно оценить уровень первичной продукции озера, при котором в гипolimнионе возникнут анаэробные условия. Данные мониторинга термического и кислородного режима водоемов мира позволяют рассчитать условия появления зон аноксии в гипolimнионе.

Для расчета использовались данные наблюдений в 16 водоемах мира, выбранных по опубликованной информации об озерах в справочном издании Международного комитета по охране озер [ILEC..., 1987]. 13 из этих водоемов представляют собой типичные озера умеренного климатического пояса, 3 – водохранилища. В водоемах путем анализа опубликованных графиков и таблиц, характеризующих вертикальное распределение температуры и содержания растворенного кислорода в течение вегетационного периода, были выделены зоны эпи- и гипolimниона. Затем концентрации кислорода внутри этих слоев осреднялись, а для эпимлиниона проводилось осреднение также и по времени (за вегетационный период). По полученным зависимостям минимальных значений концентрации кислорода в гипolimнионе от величины первичной продукции (ПП) озер установлены критические значения ПП, при которых в гипolimнионе возникает аноксия. Результаты проведенных расчетов и соответствующие линейные зависимости концентраций кислорода в гипolimнионе от величины ПП показаны в таблице 1.

Таблица 2. Оценка аноксии в озерах

| Водоем | ПП фактическая, гС/ (м ² год) | ПП расчетная, гС/ (м ² год) | Наличие аноксии | Коэффициент формы | H _{ср} , м |
|-------------------------|--|--|-----------------|-------------------|---------------------|
| оз. Глубокое (Россия) | 882 | 888 | Есть | 0,29 | 9,3 |
| оз. Плещеево (Россия) | 615 | 541 | Есть | 0,46 | 11,2 |
| оз. Виллстон (США) | 70 | 950 | Нет | 0,26 | 43,3 |
| вдхр. Ла Гранд (Канада) | 600 | 1150 | Нет | 0,16 | 21,8 |

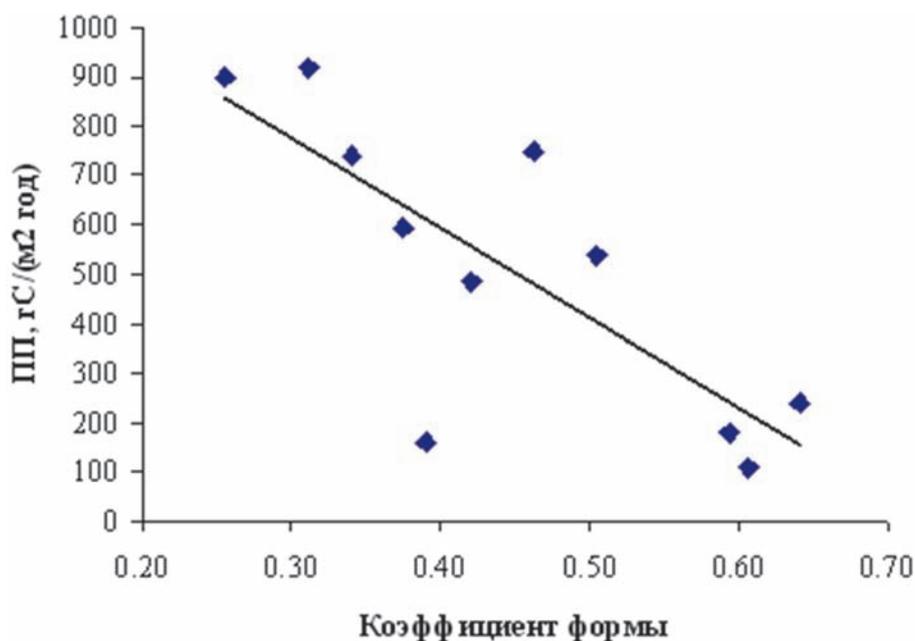
Однако изменение концентрации кислорода в гипolimнионе зависит также от условий вертикального обмена в озере, в результате которого воды гипolimниона подпитываются богатыми кислородом водами эпилимниона. Интенсивность этого обмена определяется условиями вертикальной плотностной стратификации, которая в свою очередь тесно связана с морфометрическими характеристиками озера – средней и максимальной глубиной. Таким образом, анаэробные условия в гипolimнионе являются функцией первичной продукции и формы чаши водоема.

Используя полученные нами критические значения величины ПП, можно эмпирически оценить влияние морфометрических характеристик на возникновение анаэробных зон в гипolimнионе. Форма чаши и глубина озера определяют интенсивность вертикального перемешивания водной массы озера, которая оценивается в расчетной формуле коэффициентом диффузии кислорода из эпилимниона в гипolimнион. В качестве показателя, характеризующего морфометрические характеристики озер, нами использовался коэффициент

формы, равный отношению средней глубины озера к максимальной. Однако в глубоких озерах большой объем гипolimниона способствует снижению роли окисления органического вещества, поступающего из трофогенного эпилимниона, в потреблении кислорода, что и приводит к завышению критической величины ПП по использованной для ее расчетов модели. Напротив, расчетные значения ПП в мелководных водоемах, где влияние вертикального перемешивания на подпитку гипolimниона кислородом становится доминирующим, занижаются. Учитывая эти особенности, из расчетов были исключены одно глубокое озеро – Боденское – и два относительно мелководных озера – Маларен (Швеция) и Огавара (Япония). Кроме того, исключены были водохранилища, для которых расчет коэффициента формы по соотношению глубин не имеет смысла.

Сопоставление значений коэффициента формы с оцененными по модели величинами критической продукции позволило получить линейную зависимость (рис.).

Эта связь показывает, что чем ниже значение коэффициента формы озера, т. е. чем



Зависимость критической величины первичной продукции от коэффициента формы озера

ближе форма озера к конусу, тем меньше работы ветра нужно затратить для его перемешивания и тем больше должна быть ПП озера, чтобы в гипolimнионе возникли анаэробные условия. Для диапазона средних глубин озер от 15 до 60 м зависимость характеризуется высоким достоверным коэффициентом корреляции (0,78).

Для верификации полученной зависимости применены данные о распределении кислорода и появлении зон аноксии в некоторых озерах, которые не использовались при получении вышеприведенной зависимости. Результаты этой проверки представлены в таблице 2.

Представленные в таблице оценки показывают, что при значениях ПП, близких или превышающих расчетные (оз. Плещеево), в водоеме наблюдается устойчивая аноксия. При фактической продуктивности водоема, далекой от расчетной, аноксия отсутствует. Например, в оз. Виллстон следует ожидать, что вероятность возникновения аноксии крайне мала, т. к. фактическая ПП более чем на порядок ниже расчетной.

Таким образом, эту простую линейную зависимость можно использовать для ориентировочной оценки уровня продуктивности водоема, при котором весьма вероятно возникновение анаэробных условий в гипolimнионе. Можно предположить, что проведенный анализ влияния морфометрических характеристик и продукционных процессов водоема на

появление анаэробных зон в водоеме справедливо также и для водохранилищ. Однако, учитывая значительную специфику динамического режима водохранилищ по сравнению с озерами, а также резко отличающиеся от озерных формы котловин водохранилищ, для подтверждения подобного предположения необходимы специальные исследования с использованием данных о гидротермическом и кислородном режиме водохранилищ.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 15-05-06108).

Литература

Chapra S. C., Canale R. P. Long-term phenomenological model of phosphorus and oxygen in stratified lakes // *Water Research*. 1991. Vol. 25 (6). P. 707–715.

Cornett R. J., Rigler F. H. Hypolimnetic oxygen deficits: their prediction and interpretation // *Science*. 1979. Vol. 205 (3). P. 580–581.

Hutchinson G. E. On the relation between the oxygen deficit and the productivity and typology of lakes // *Int. Rev. Gesamten Hydrobiol.* 1938. Vol. 36. P. 336–355.

ILEC (International Lake Environmental Committee) (1987–1989). *Data Book of World Lake Environments. A Survey of the State of World Lakes*. Japan. Vol. 1, 2, 3, 4, 5.

Поступила в редакцию 22.06.2016

References

Chapra S. C., Canale R. P. Long-term phenomenological model of phosphorus and oxygen in stratified lakes. *Water Research*. 1991. Vol. 25 (6). P. 707–715.

Cornett R. J., Rigler F. H. Hypolimnetic oxygen deficits: their prediction and interpretation. *Science*. 1979. Vol. 205 (3). P. 580–581.

Hutchinson G. E. On the relation between the oxygen deficit and the productivity and typology of

lakes. *Int. Rev. Gesamten Hydrobiol.* 1938. Vol. 36. P. 336–355.

ILEC (International Lake Environmental Committee) (1987–1989). *Data Book of World Lake Environments. A Survey of the State of World Lakes*. Japan. Vol. 1, 2, 3, 4, 5.

Received June 22, 2016

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

Даценко Юрий Сергеевич

старший научный сотрудник, к. г. н., доцент
Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова, географический факультет,
кафедра гидрологии суши
Ленинские горы, 1, Москва, Россия, 119991
эл. почта: yuri0548@mail.ru
тел.: (495) 9395470, 89035909326

CONTRIBUTOR:

Datsenko, Yuri

M. V. Lomonosov Moscow State University
1 Leninskiye Gory, 119991 Moscow, Russia
e-mail: yuri0548@mail.ru
tel.: (495) 9395470, +79035909326

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 556.51:556.048 (470.2)

РАСЧЕТ ИСПАРЯЕМОСТИ И СУММАРНОГО ИСПАРЕНИЯ С ВОДОСБОРОВ СЕВЕРО-ЗАПАДА РОССИИ

Ю. А. Сало, Л. Е. Назарова, А. Ф. Балаганский

Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН

В статье дается сравнение результатов расчета испаряемости и суммарного испарения с водосборов Северо-Запада РФ по нескольким наиболее известным зависимостям, разработанным разными авторами. Показано, что наилучшие результаты дают расчеты по формулам Э. М. Ольдекопа и П. Шрайбера, в которых нормы испаряемости рассчитываются по предложенному уравнению связи, полученному Ю. А. Сало. Предложена схема расчета стока с неизученных в гидрологическом отношении водосборов по имеющимся данным наблюдений за температурой воздуха и атмосферными осадками.

Ключевые слова: испаряемость; испарение; сток с водосбора.

Yu. A. Salo, L. E. Nazarova, A. F. Balagansky. **COMPUTATIONS OF
EVAPORATION FROM WATERSHEDS OF NORTH-WESTERN RUSSIA**

The paper presents a comparison between the results of calculations of the potential rate of evaporation and gross evaporation from watersheds of Northwest Russia with some best known dependencies developed by different authors. It is demonstrated that the best results are achieved using the formulae developed by Oldekop and Schreiber, where normal potential rates of evaporation are calculated with a regression obtained by Yu. A. Salo. A model for estimating runoff from hydrologically understudied watersheds based on observed data on air temperature and atmospheric precipitation is proposed.

Keywords: potential rate of evaporation; evaporation; runoff.

Введение

Одной из основных составляющих водного баланса водосборов является испарение с поверхности суши. Через величину испарения связаны уравнения водного и теплового

баланса водосбора. Особенность самого процесса испарения (включающего физическое испарение и транспирацию), разнообразие физико-географических характеристик водосборов, наличие или отсутствие исходных данных для расчета способствовали разработке

Таблица 1. Формулы для расчета годового суммарного испарения и испаряемости

| Автор | Расчетная формула | |
|-----------------------------|--|---|
| | в исходном виде | относительно E_o |
| П. Шрайбер | $E = P \left(1 - e^{-\frac{E_o}{P}} \right)$ | $E_o = -P \ln \left(1 - \frac{E}{P} \right)$ |
| В. С. Мезенцев и Л. Тюрк | $E = E_o \left[1 + \left(\frac{P}{E_o} \right)^{-n} \right]^{\frac{1}{n}}$ | $E_o = \frac{EP}{\sqrt{P^2 - E^2}}$ (при $n = 2$) |
| Э. М. Ольдекоп | $E = E_o th \left(\frac{P}{E_o} \right)$ | в явном виде отсутствует |
| М. И. Будыко | $E = \sqrt{E_o th \left(\frac{P}{E_o} \right) P \left(1 - e^{-\frac{E_o}{P}} \right)}$ | в явном виде отсутствует |
| Л. Тюрк | | $E_o = 300 + 25T^2 + 0,05T^3$ |
| А. Н. Постников | | $E_o = (350 + 5,5T) e^{0,07T}$ |

большого количества методов расчета испарения. Среди них можно особо выделить методы, основанные на уравнении связи (в том или ином виде) испарения E и атмосферных осадков P с учетом испаряемости E_o . В качестве последней величины обычно рассматривается максимально возможное испарение при данных метеорологических условиях с достаточно увлажненной подстилающей поверхности. Наиболее известны расчетные зависимости, разработанные П. Шрайбером, Э. М. Ольдекопом, М. И. Будыко, В. С. Мезенцевым, Л. Тюрком и др. [Багров, 1954; Мезенцев, 1973; Методы изучения..., 1981; Братсерт, 1985]. Величина испаряемости непосредственно зависит от поступления тепла к испаряющей поверхности, т. е. от ее радиационного баланса. М. И. Будыко [1948] показал, что $E_o = R_o/L$, где R_o – радиационный баланс увлажненной территории, L – скрытая теплота испарения. Определение радиационного баланса водосборов затруднено, а иногда и невозможно из-за редкой сети специализированных метеорологических станций, поэтому разработаны эмпирические методы определения E_o на основе использования сетевой гидрометеорологической информации [Константинов, 1971; Методы изучения..., 1981; Братсерт, 1985]. Зависимости вида $E_o = E_o(T)$, где T – норма температуры воздуха, предложены, в частности, Л. Тюрком в 1955 году и А. Н. Постниковым [1999].

Поскольку на территории Республики Карелия отсутствуют массовые и продолжительные инструментальные наблюдения, необходимые для расчета элементов радиационного баланса, режима грунтовых вод, водно- и теплофизических свойств почвогрунтов и других характеристик, определяющих испарение с поверхности суши (к настоящему времени на сети станций и постов Карелии полностью

прекращены наблюдения по водным и почвенным испарителям), в работе была поставлена задача оценить применимость наиболее распространенных формул для расчета нормы испаряемости и суммарного испарения для исследуемой территории.

Материалы и методы

В данной работе были проанализированы наиболее известные формулы вида $E = E(P, E_o)$, приведенные в таблице 1 (в исходном виде и преобразованные нами относительно E_o).

Для сравнительного анализа искомым результатам были использованы опубликованные данные по многолетнему водному балансу (осадки, средний годовой речной сток и испарение) за период 1891–1960 гг. для речных водосборов Северо-Запада России [Водные ресурсы..., 1967]. Схема расположения 46 водосборов, сведения об элементах водного баланса которых были использованы при расчетах (далее – расчетных водосборах), и 15 контрольных водосборов показана на рисунке 1. Норма годовой температуры воздуха T для каждого из них определена по картам [Климатический атлас..., 1960].

Для каждого расчетного водосбора по известным значениям нормы осадков и суммарного испарения по формулам Шрайбера, Мезенцева – Тюрка, Тюрка и Постникова были рассчитаны значения средней многолетней величины испаряемости E_o . Формулы Ольдекопа и Будыко нельзя преобразовать к простому относительно E_o виду из-за использования гиперболического тангенса, поэтому расчет по ним выполнялся подбором по известным значениям P и E для каждого расчетного водосбора. Затем для каждой формулы исследовалась зависимость испаряемости от температуры



Рис. 1. Схема расположения центров расчетных (1) и контрольных (2) водосборов

воздуха. В качестве основного для исследования связей климатических характеристик и элементов водного баланса территории выбран метод статистического анализа.

Результаты и обсуждение

В результате проведенного исследования установлено, что зависимость испаряемости от температуры воздуха может быть выражена полиномом степени $n = 2$

$$E_o = a_0 + a_1 \cdot T + a_2 \cdot T^2. \quad (1)$$

Численные значения параметров уравнения (1) (табл. 2), вычисленные с использованием

программы Statistica, заметно различаются в зависимости от того, какая формула используется для расчета E_o .

Как показал А. П. Вершинин [1999], «несмотря на имеющуюся в литературе взаимную критику методов, принципиальных различий между ними нет», однако при практическом применении уравнений связи можно получить существенно разные результаты.

Проверка полученных зависимостей была выполнена как по исходной (46 водосборов), так и по независимой выборке (15 водосборов). Для каждого из них были рассчитаны значения нормы испаряемости $E_o(T)$ по уравнению (1) с коэффициентами из таблицы 2 и формулам

Таблица 2. Значения параметров уравнения (1) для различных расчетных формул

| Автор | Значения параметров | | |
|--------------------------|---------------------|-------|-------|
| | a_0 | a_1 | a_2 |
| П. Шрайбер | 433 | 95 | 3,41 |
| М. И. Будыко | 377 | 77 | 2,69 |
| В. С. Мезенцев – Л. Тюрк | 362 | 75 | 2,86 |
| Э. М. Ольдекоп | 329 | 62 | 2,14 |

Тюрка и Постникова и суммарного испарения $E(P, E_0)$ для всех рассматриваемых зависимостей, а также оценена их абсолютная и относительная погрешность.

Сопоставление показало, что наилучшие результаты дают формулы Ольдекопа и Шрайбера, в которых нормы испаряемости рассчитываются по полученному уравнению связи (1) с соответствующими коэффициентами из таблицы 2 (рис. 2). При этом рассчитанные по указанным формулам величины испарения практически совпадают для всех контрольных водосборов (графики 2 и 4 на рис. 2). Использование для расчетов испаряемости остальных формул, представленных в таблице 1, дает менее точные результаты.

Расчеты испаряемости и испарения по формуле Ольдекопа, в которой нормы испаряемости рассчитывались по предложенному уравнению связи, были использованы при изучении динамики элементов водного баланса водосбора Онежского озера в условиях нестационарности климата [Назарова, 2010].

Поскольку Онежское озеро фактически является водохранилищем, в качестве климато-зависимого элемента был исследован приток воды в озеро. Для оценки влияния изменения

климата на речной сток с водосбора была установлена связь между речным стоком и климатическими характеристиками. Для годовых интервалов уравнение водного баланса было рассмотрено в виде:

$$P - R - E [P, E_0(T)] \pm W = 0, \quad (2)$$

где P – суммы атмосферных осадков, мм; R – общий речной сток, мм; E – суммарное испарение с водосбора; E_0 – испаряемость, мм; W – остаточный член уравнения, объединяющий аккумуляционные и неучтенные составляющие годового баланса, а также погрешности расчета всех характеристик.

При расчете суммарного испарения для речных водосборов была использована формула Э. М. Ольдекопа (см. табл. 1), в которой испаряемость рассчитывалась по формуле, полученной для территории Карелии [Сало, 2003]:

$$E_0 = 329 + 62T + 2,14T^2. \quad (3)$$

Далее была установлена зависимость W от средней по водосбору годовой температуры воздуха и годовых сумм атмосферных осадков, коэффициенты парной корреляции равны $-0,81$ и $+0,59$ соответственно:

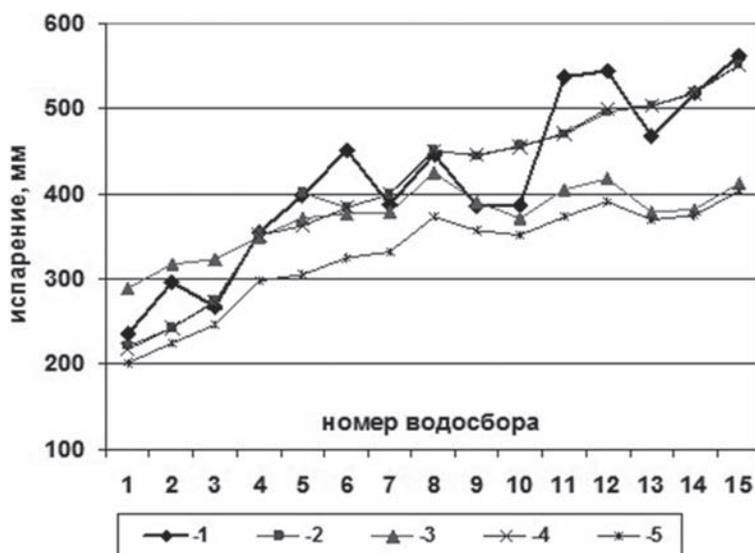


Рис. 2. Суммарное испарение с контрольных водосборов (1) [Водные ресурсы..., 1967] и рассчитанное по формулам Ольдекопа (2), Будыко (3), Шрайбера (4) и Мезенцева–Тюрка (5)

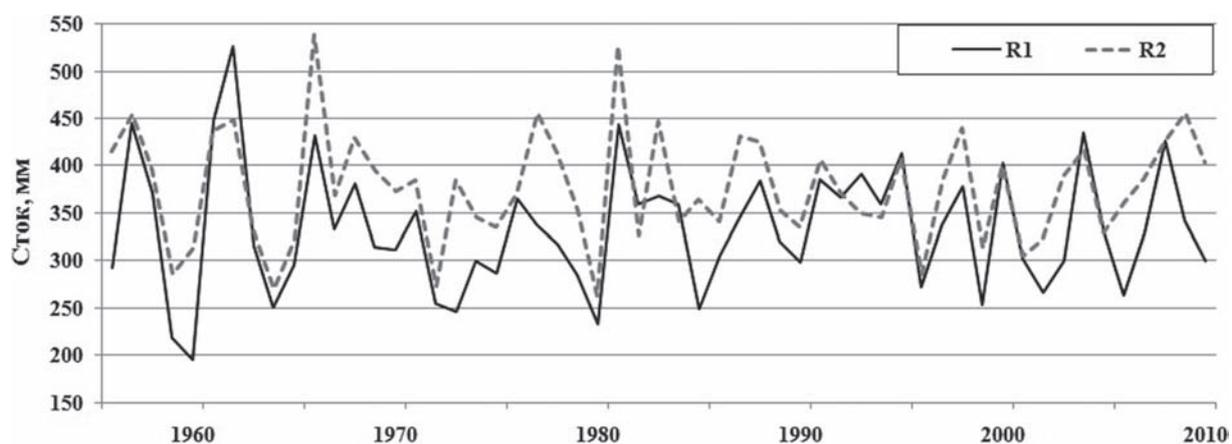


Рис. 3. Сток с водосбора Онежского озера, мм: R1 – по данным многолетних наблюдений; R2 – рассчитанный по формулам (2)–(4)

$$W = -211 + 0,38P - 46,04T. \quad (4)$$

Коэффициент множественной корреляции полученной зависимости равен 0,80, стандартная ошибка расчета по формуле составила 5,7 %. Полученная формула для водосбора Онежского озера может быть использована для расчета параметра W , используя ряды годовой температуры воздуха и годовых сумм осадков [Назарова, 2010].

В результате проведенных вычислений, выполненных по предложенным формулам (2)–(4), был получен многолетний ряд значений притока воды в Онежское озеро.

Для проверки достоверности полученного ряда был проведен расчет притока с привлечением данных по стоку изученных в гидрологическом отношении рек водосбора. В Онежское озеро впадают 52 реки длиной более 10 км [Гронская, 2008]. В гидрологическом отношении изучено 20 рек. Длина рядов наблюдений за стоком различна. В процессе работы временные ряды значений среднегодового стока рек – притоков Онежского озера удлинились, пропуски наблюдений были восстановлены, для чего применялись общепринятые методы, изложенные в работах [Ресурсы..., 1972; Многолетние данные..., 1986]. Полученные восстановленные ряды оценивались на однородность по критериям Стьюдента и Фишера.

Для оценки притока в Онежское озеро по периметру с учетом асимметричности водосбора были уточнены и оцифрованы площади водосборов как самого озера, так и его притоков. Сток с неизученной территории принимался как среднее арифметическое между значениями модуля стока со смежных водосборов. В случае, когда смежный водосбор с малой величиной площади граничит с большим по площади водосбором и малым (изученная территория),

величина его модуля стока принималась по водосбору с наименьшей величиной. В результате проделанной работы был получен ряд средних годовых значений стока в Онежское озеро за 1956–2010 гг. [Балаганский и др., 2015].

На рисунке 3 представлены значения стока с водосбора Онежского озера, полученные по данным многолетних наблюдений и уточненные с учетом стока с неизученных территорий, и результаты расчета притока воды в водоем, выполненные по предложенным формулам (2)–(4). Как следует из приведенных графиков, полученные расчетные результаты хорошо соответствуют измеренным величинам. Коэффициент корреляции составляет 0,73, средняя ошибка расчета 11 %. Предложенная нами схема расчета может быть использована для оценки стока с неизученных в гидрологическом отношении водосборов Северо-Запада России по имеющимся данным наблюдений за температурой воздуха и атмосферными осадками.

Выводы

Целью данного исследования было оценить применимость известных методов расчета испаряемости и испарения и уточнить их для водосборов Северо-Запада России. Показано, что наилучшие результаты дают расчеты по формулам Ольдекопа и Шрайбера, в которых нормы испаряемости рассчитываются по уравнению связи (1) с предложенными коэффициентами. Уравнения связи испаряемости и температуры воздуха могут быть использованы как региональные формулы для уточнения годовых и многолетних значений испаряемости и суммарного испарения, их расчета для неизученных водосборов, уточнения карт норм основных составляющих водного баланса региона. Предложенная нами схема расчета (зависимости

2–4) может быть использована для оценки стока с неизученных в гидрологическом отношении водосборов Северо-Запада России по имеющимся данным наблюдений за температурой воздуха и атмосферными осадками.

Литература

Багров Н. А. О расчете испарения с поверхности суши // Метеорология и гидрология. 1954. № 2. С. 12–18.

Балаганский А. Ф., Карпечко В. А., Литвиненко А. В., Сало Ю. А. Ресурсы речного стока и водный баланс // Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. С. 31–38.

Братсерт У. Х. Испарение в атмосферу. Теория, история, приложения. Л.: Гидрометеоздат, 1985. С. 290–293.

Будыко М. И. Испарение в естественных условиях. Л.: Гидрометеоздат, 1948. 136 с.

Вершинин А. П. Анализ и оценка современных методов определения испарения с природных ландшафтов // Современные проблемы гидрометеорологии. СПб.: РГГМУ, 1999. С. 121–141.

Водные ресурсы и водный баланс территории Советского Союза. Л.: Гидрометеоздат, 1967. 200 с.

Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. Москва, 2014. 60 с.

Гронская Т. П. Водные ресурсы озер // Водные ресурсы России и их использование / Ред. И. А. Шикломанов. СПб.: ГГИ, 2008. С. 166–175

Климатический атлас СССР / Ред. Ф. Ф. Давитая. М.: ГУГМС, 1960. Т. 1. С. 7–42.

Константинов А. Р. Испарение в природе. Л.: Гидрометеоздат, 1971. 532 с.

Литвиненко А. В., Богданова М. С., Карпечко В. А., Литвинова И. А. Исследование водных ресурсов бассейна Онежского озера и их использования на основе ГИС-технологий // Известия РГО. 2012. Т. 144, вып. 2. С. 69–80.

Мезенцев В. С. Расчеты водного баланса. Омск: ОСХИ, 1973. 80 с.

Методические рекомендации по оценке однородности гидрологических характеристик и определению их расчетных значений по неоднородным данным / Государственный гидрологический институт. СПб., 2010. 162 с.

Методы изучения и расчета водного баланса / Ред. В. С. Вуглинский, Г. С. Клейн и др. Л.: Гидрометеоздат, 1981. С. 201–233.

Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Бассейны рек Балтийского моря, Онежского и Ладожского озер. Л.: Гидрометеоздат, 1986. Т. 1, вып. 5. 687 с.

Назарова Л. Е. Влияние колебания климата на сток с водосбора Онежского озера // География и природные ресурсы. 2010. № 1. С. 171–174.

Постников А. Н. К оценке среднемноголетнего суммарного испарения с поверхности суши на основе уравнений связи // Современные проблемы гидрометеорологии. СПб.: РГГМУ, 1999. С. 141–152.

Ресурсы поверхностных вод СССР. Основные гидрологические характеристики. Карелия и Северо-Запад. Л.: Гидрометеоздат, 1972. Т. 2. 957 с.

Сало Ю. А. Закономерности многолетних колебаний элементов водного баланса территории Карелии: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. СПб., 2003. 24 с.

Швец П. Д. Водный баланс Онежского озера // Сб. работ Ленинградской гидрометеобсерватории. Л., 1977а. Вып. 2. С. 25–53.

Швец П. Д. Гидрологическая изученность Онежского озера и его бассейна // Исследование режима и расчеты водного баланса озер-водохранилищ Карелии. Л., 1977б. Вып. 2. С. 3–24.

Поступила в редакцию 19.05.2016

References

Bagrov N. A. O raschete ispareniya s poverkhnosti sushi [On the calculation of land surface evaporation]. *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and Hydrology]. 1954. No. 2. P. 12–18.

Balaganskii A. F., Karpechko V. A., Litvinenko A. V., Salo Yu. A. Resursy rechnogo stoka i vodnyi balans [River runoff resources and water balance]. *Krupneishie ozera-vodokhranilishcha Severo-Zapada evropeiskoi territorii Rossii: sovremennoe sostoyanie i izmeneniya ekosistem pri klimaticheskikh i antropogennykh vozdeistviyakh* [The largest impounded lakes of the North-western part of European Russia: current state and ecosystem changes under climatic and human impacts]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2015. P. 31–38.

Bratsert U. Kh. Isparenie v atmosferu. Teoriya, istoriya, prilozheniya [Evaporation into the atmosphere. Theory, history, applications]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1985. P. 290–293.

Budyko M. I. Isparenie v estestvennykh usloviyakh [Evaporation under natural conditions]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1948. 136 p.

Gronskaya T. P. Vodnye resursy ozer [Water Resources of Lakes]. *Vodnye resursy Rossii i ikh ispol'zovanie* [Water resources of Russia and their uses]. Ed. I. A. Shiklomanov. St. Petersburg, 2008. P. 166–175.

Klimaticheskii atlas SSSR [Climate Atlas of the USSR]. Ed. F. F. Davitaya. Moscow, 1960. Vol. 1. P. 7–42.

Konstantinov A. R. Isparenie v prirode [Evaporation in nature]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1971. 532 p.

Litvinenko A. V., Bogdanova M. S., Karpechko V. A., Litvinova I. A. Issledovanie vodnykh resursov basseina Onezhsogo ozera i ikh ispol'zovaniya na osnove GIS-tekhologii [Study of the water resources of the Lake Onego catchment and their exploitation on the basis of GIS technology]. *Izvestiya RGO* [The RGS Herald]. 2012. Vol. 144, iss. 2. P. 69–80.

Mezentsev V. S. Raschety vodnogo balansa [Water balance calculations]. Omsk: OSKhl, 1973. 80 p.

Metodicheskie rekomendatsii po otsenke odnorodnosti gidrologicheskikh kharakteristik i opredeleniyu ikh raschetnykh znachenii po neodnorodnym dannym [Methodological recommendations on the assessment of the hydrological characteristics homogeneity and determination of their calculated value based on heterogeneous data]. Gosudarstvennyi gidrologicheskii institut [State Hydrological Institute]. St. Petersburg, 2010. 162 p.

Metody izucheniya i rascheta vodnogo balansa [Methods of water balance study and calculation]. Eds. V. S. Vuglinskii, G. S. Klein et al. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1981. P. 201–233.

Mnogoletnie dannye o rezhime i resursakh poverkhnostnykh vod sushi. Basseiny rek Baltiiskogo morya, Onezhskogo i Ladozhskogo ozer [Long-term data on the regime and resources of land surface waters. Drainage basins of the Baltic Sea rivers, lakes Onego and Lado-ga]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1986. Vol. 1, iss. 5. 687 p.

Nazarova L. E. Vliyanie kolebaniya klimata na stok s vodosbora Onezhskogo ozera [Climate fluctuations influence on the runoff from the Lake Onego catchment]. Geografiya i prirodnye resursy [Geography and Natural Resources]. 2010. No. 1. P. 171–174.

Postnikov A. N. K otsenke srednemnogoletnego summarnogo ispareniiya s poverkhnosti sushi na osnove uravnenii svyazi [On estimating the long-term annual average of the land surface evaporation based on the constraint equation]. Sovremennye problemy gidrometeorologii [Journal of Hydrometeorology]. St. Petersburg: RGGMU, 1999. P. 141–152.

Resursy poverkhnostnykh vod SSSR [Surface water resources of the USSR]. Osnovnye gidrologicheskie kharakteristiki. Kareliya i Severo-Zapad [Main hydrological

characteristics. Karelia and the North-West Russia]. Leningrad, 1972. Vol. 2. 957 p.

Salo Yu. A. Zakonomernosti mnogoletnikh kolebaniy elementov vodnogo balansa territorii Karelii [Some patterns of long-term fluctuations of water balance elements in Karelia]: Summary of PhD (Cand. of Geogr.) thesis. St. Petersburg, 2003. 24 p.

Shvets P. D. Vodnyi balans Onezhskogo ozera [Lake Onego water balance]. Sb. rabot Leningradskoi gidrometeoobservatorii [Proceedings of the Leningrad Hydrometeorological Observatory]. Leningrad, 1977a. Iss. 2. P. 25–53.

Shvets P. D. Gidrologicheskaya izuchennost' Onezhskogo ozera i ego basseina [State of hydrological knowledge of Lake Onego and its catchment]. Issledovanie rezhima i raschety vodnogo balansa ozer-vodokhranilishch Karelii [Regime studies and water balance calculations of impounded lakes in Karelia]. Leningrad, 1977b. Iss. 2. P. 3–24.

Vershinin A. P. Analiz i otsenka sovremennykh metodov opredeleniya ispareniiya s prirodnykh landshaftov [Analysis and assessment of the current methods for determination of evaporation from natural landscapes]. Sovremennye problemy gidrometeorologii [Journal of Hydrometeorology]. St. Petersburg: RGGMU, 1999. P. 121–141.

Vodnye resursy i vodnyi balans territorii Sovetskogo Soyuza [Water resources and water balance of the Soviet Union]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1967. 200 p.

Vtoroi otsenochnyi doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii. Obshchee rezyume [The Second Assessment Report of Roshydromet on Climate Change and its Impact on the Territory of the Russian Federation. General Summary]. Moscow, 2014. 60 p.

Received May 19, 2016

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Сало Юрий Андреевич

старший научный сотрудник лаборатории географии и гидрологии, к. г. н.
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030

Назарова Лариса Евгеньевна

заместитель директора по НИР, к. г. н.
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: nazarova@nwpi.krc.karelia.ru
тел.: (8142) 576381

Балаганский Андрей Федорович

главный гидролог лаборатории географии и гидрологии
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
тел.: (8142) 576381

CONTRIBUTORS:

Salo, Yuri

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia

Nazarova, Larisa

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: nazarova@nwpi.krc.karelia.ru
tel.: (8142) 576381

Balagansky, Andrey

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
tel.: (8142) 576381

УДК 330.42, 556

ON THE SENSITIVITY OF ECOLOGICAL ECONOMICS MODELS OF LAKE WATER RESOURCE MANAGEMENT TO THE WELFARE FUNCTION PARAMETERS

D. V. Kovalevsky

*Nansen International Environmental and Remote Sensing Centre (NIERSC),
Saint Petersburg State University*

A generalized version of the shallow lake economics model, built upon the initial version of the model as described in a seminal paper by Mäler et al. (2003) was developed and analyzed. The model is able to simulate the coupled economic-ecological dynamics under the conditions of pronounced nonlinearity of the ecological (lake) module leading to hysteresis effects and irreversibility for certain values of model parameters. The decision-making in the area of lake water management is parameterized by the social welfare function consisting of two terms: the utility originating from the economic activity in the lake surroundings (increasing with the anthropogenic loading on the lake), and the disutility originating from the pollution of the lake (increasing with the pollution level). From the economic side, the problem is therefore to find a tradeoff between the level of economic activity in the lake surroundings and the pollution level. In the basic version of the model, the disutility related to pollution is quadratic in phosphorous concentration. This quadratic disutility is replaced with a more general power law, and the sensitivity of the generalized model to its exponent is explored. The numerical analysis performed suggests that the generalized model is quantitatively sensitive to varying the value of the exponent, yet structurally robust.

Key words: lake pollution dynamics; nonlinearity; hysteresis; anthropogenic loading; mathematical economics; optimal control.

Д. В. Ковалевский. О ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ УПРАВЛЕНИЯ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ ОЗЕР К ПАРАМЕТРАМ ФУНКЦИИ БЛАГОСОСТОЯНИЯ

Разработана и проанализирована обобщенная версия модели экономики мелких озер, основой для которой послужила модель, описанная в пионерной работе Mäler et al. (2003). Модель состоит из двух взаимосвязанных модулей – экономического и экологического (озерного). Последний задан в форме нелинейной динамической модели, связывающей изменение концентрации фосфора в озере с внешней (в том числе антропогенной) нагрузкой. Модель способна воспроизводить динамику объединенной эколого-экономической системы в условиях сильной нелинейности экологического модуля, при определенных значениях параметров модели приводящей к гистерезисным эффектам и необратимости. Принятие решений в области управления водными ресурсами озера формализуется путем введения функции благосостояния, включающей в себя полезность, обусловленную высоким уровнем экономической активности на водосборе (растущую с ростом антропо-

генной нагрузки на озеро), а также негативные эффекты, вызванные загрязнением озера (усиливающиеся с ростом уровня загрязнения). С экономической точки зрения задача сводится к нахождению оптимального компромисса между ростом экономической активности и усилением загрязнения озера. В исходной версии модели указанные негативные эффекты предполагаются квадратичными по концентрации фосфора в озере. В настоящей работе в статическом случае выполнен анализ обобщенной версии модели, в которой указанная квадратичная зависимость заменена более общей степенной зависимостью с произвольным показателем. Выполненные численные расчеты свидетельствуют о том, что обобщенная модель, будучи чувствительной к значению показателя степени на количественном уровне, остается тем не менее структурно устойчивой при варьировании данного значения.

Ключевые слова: динамика загрязнения озера; нелинейность; гистерезис; антропогенная нагрузка; экономико-математические методы; оптимальное управление.

1. Introduction

Modeling of lake dynamics, human impacts on lake ecosystems, and elaboration of model-based scenarios of sustainable water management in catchments has remarkably advanced in recent decades [Astrakhantsev et al., 2003; Menshutkin et al., 2014; Rukhovets and Filatov, 2010, 2014]. Natural scientists develop detailed, realistic models with fine spatial resolution, incorporating the description of numerous complex processes evolving in lakes and lake ecosystems. However, despite all these impressive advances, there is still room for simple models in this research area. Economic-ecological models of lake water management, where both the economic and the ecological modules of the coupled model are often highly stylized, are able to generate surprisingly rich and versatile dynamics, and also to supply decision-makers in the area of sustainable water resource management with non-trivial policy relevant information.

Particularly, a new research area known as “economics of shallow lakes” has evolved recently within the domain of ecological economics [Mäler et al., 2003; Moghayer, 2012; Moghayer and Wagener, 2012; Wagener, 2013]. The present paper is devoted to the analysis of a generalized version of the shallow lake economics model, built upon the ‘canonical’ version of the model as described in a seminal paper by Mäler et al. [2003].

It should be noted from the very beginning that, in the author’s opinion, the adjective ‘shallow’ in the term “economics of shallow lakes” should in no way be regarded as a ‘keyword’. Instead, already in the pioneering paper by Mäler et al. [2003] cited above, the authors express their firm belief that “... it can be expected that the same type of model will be adequate <for deep lakes>” [Mäler et al., 2003, p. 108]. Recent studies provide new supporting evidence to this argument. Particularly, the hysteresis effects successfully mimicked by the shallow lake

model (Sec. 2 below) – probably, the most interesting feature of the modelling framework presented below – are apparently relevant not for shallow lakes only, but also for certain deep lakes, e. g. the Lake Ladoga [Pozdnyakov et al., 2013].

The rest of the paper is structured as follows. The ecological module of the shallow lake economics model is described in Sec. 2, while the economic module of the same model is outlined in Sec. 3. In Sec. 4, a generalized shallow lake economics model is presented and analyzed in a static case. Particularly, the sensitivity of the model to the specification of social welfare is estimated numerically. Sec. 5 concludes.

2. Phosphorous concentration dynamics in a shallow lake

Following Carpenter and Cottingham [1997] and Scheffer [2004], Mäler et al. [2003] model the dynamics of the eutrophication process in a shallow lake by an ordinary differential equation of the form

$$\dot{P}(t) = L(t) - \xi P(t) + r \frac{P^2(t)}{P^2(t) + m^2}, P(0) = P_0, \quad (1)$$

where $P(t)$ is the amount of phosphorous in algae, $L(t)$ is the loading (i. e. the input of phosphorous), including the anthropogenic fraction, ξ is the rate of loss caused by sedimentation, outflow and sequestration in other biomass, r is the maximum rate of internal loading, and m is the anoxic level. Note that ξ , r , and m are constant, while the loading $L(t)$ is generally time-dependent. Hereinafter, the dot over a variable denotes the time derivative. For a brief non-technical discussion of ecological processes in shallow lakes mimicked by Eq. (1) see [Wagener, 2013, Sec. 2.1].

By introducing non-dimensional variables

$$s(t) = \frac{P(t)}{m}, \quad (2)$$

$$a(t) = \frac{L(t)}{r}, \quad (3)$$

a non-dimensional lake parameter

$$b = \frac{\xi m}{r}, \quad (4)$$

and the non-dimensional time

$$t' = \frac{rt}{m} \quad (5)$$

(the prime in Eq. (5) will be omitted below), we rewrite Eq. (1) in a non-dimensional form

$$\dot{s} = a(t) - g(s), \quad s(0) = s_0, \quad (6)$$

where an auxiliary function $g(s)$ is introduced:

$$g(s) = bs - \frac{s^2}{1+s^2}. \quad (7)$$

Dependent on the value of the lake parameter b , a simple dynamic model (6)–(7) can demonstrate pronounced nonlinearity, hysteresis effects, and irreversibility¹.

Suppose that the non-dimensional loading $a(t)$ is constant over time: $a(t) = a = \text{const}$. Then, according to Eqs. (6)–(7), the non-dimensional phosphorous concentration $s(t)$ will asymptotically converge to a steady state where

$$a = g(s). \quad (8)$$

If there are multiple steady states, the particular steady state to which the concentration converges may depend on the initial condition s_0 .

The curve $a = g(s)$ is called the response curve of the system. Three response curves corresponding to three different values of the lake parameter b ($b = 0.48$; 0.50 ; 0.52) are shown in Figure 1.

It is easy to prove that in the case of $b \geq 3\sqrt{3}/8$ ($b \geq 0.65$; case not shown in Figure 1) there is one and only one steady state for every value of a .

If $1/2 < b < 3\sqrt{3}/8$ ($0.5 < b < 0.65$), we have the reversible case and the hysteresis effect (see the light gray curve in Figure 1 corresponding to $b = 0.52$). For a certain range of loading, there are now three steady states. Two of them (designated as solid parts of the curve) are stable (referred to as low pollution (LP) steady state and high pollution (HP) steady state below), while the third one (marked as a dashed part of the curve) is unstable.

¹ It should be mentioned that research questions related to nonlinearity, thresholds and irreversibility in coupled economic-environmental models in the presence of environmental tipping points go well beyond the particular research area of economics of shallow lakes and are also highly relevant to other areas of environmental/ecological economics, notably the economics of climate change [Arto et al., 2013].

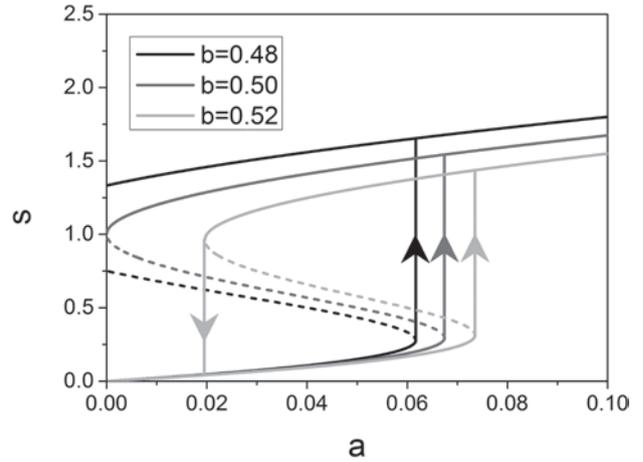


Fig. 1. The response curves of the shallow lake model for three values of the lake parameter b : the light gray curve – reversible case ($b = 0.52$); the black curve – irreversible case ($b = 0.48$); the gray curve – threshold case ($b = 0.50$). Solid curves: stable steady states. Dashed curves: unstable steady states. Horizontal axis: loading (a). Vertical axis: phosphorous concentration (s). See details in Sec. 2

Suppose that initially there is no loading ($a = 0$) and no phosphorous in the lake ($s = 0$), but then the loading starts increasing very slowly (quasi-stationary). Until a tipping point is reached, the phosphorous concentration will gradually increase along the LP branch of the light gray response curve. Then, at the tipping point, the lake will rapidly move to a HP state (light gray vertical line with an upward arrow). Suppose, then, that immediately after that the loading starts decreasing slowly. Then the concentration starts decreasing, too, along the HP branch of the light gray response curve, until another tipping point is reached, and the lake rapidly moves to a LP state (light gray vertical line with a downward arrow). This is a manifestation of the pronounced nonlinearity of the system and the hysteresis effect in the lake. Still, the lake dynamics is reversible, although profoundly nonlinear.

If $0 < b < 1/2$ ($0 < b < 0.5$), we have the irreversible case of the lake dynamics (see the black curve in Figure 1 corresponding to $b = 0.48$): if the lake is in a HP state it is trapped there and will never return to a LP state.

Finally, $b = 1/2$ ($b = 0.5$) is the threshold value of the lake parameter separating reversible cases from irreversible ones (see the gray curve in Figure 1 corresponding to $b = 0.50$).

3. Shallow lake economics

In a shallow lake economics model [Mäler et al., 2003; Wagener, 2013] the social welfare stream $W(a, s)$ is defined as

$$W = U_A - D_E, \quad (9)$$

where

$$U_A = \ln a \quad (10)$$

is the utility originating from the economic activity in the lake surroundings (higher loading implies higher level of economic, notably agricultural, activity), while

$$D_E = cs^2 \quad (11)$$

is the disutility originating from the pollution of the lake. The parameter c in Eq. (11) is the measure of economic costs of lake pollution.

In essence, the problem of the economics of shallow lakes defined by Eqs. (9)–(11) is to find a tradeoff between the level of economic activity in the lake surroundings and the level of lake pollution. From mathematical standpoint, the respective problem can be posed (and solved) at various levels of complexity.

The simplest model setup is the static analysis: provided the response curve $a = g(s)$ relating the static loading and the corresponding steady state(-s) is known, to find the ‘optimal’ value of loading (and hence of the phosphorous concentration) maximizing the welfare (9).

Alternatively, and much in the spirit of the seminal Ramsey – Cass – Koopmans model of economic growth [Barro and Sala-i-Martin, 2003], a dynamic optimization problem can be posed: to maximize the discounted welfare

$$\bar{W} = \int_0^{+\infty} W(a(t), s(t)) \exp(-\rho t) dt, \quad (12)$$

where ρ is the discount rate, $W(a(t), s(t))$ is defined by Eqs. (9)–(11), and $s(t)$ depends on $a(t)$ through the dynamic model (6)–(7).

As Wagener [2013] notes, if in Eq. (12) we adopt the value $\rho = 0$ for the discount rate (the choice advocated by Ramsey himself in his pioneering paper [Ramsey, 1928]), the optimal solutions of the dynamic optimization problem (12) will converge to those of the static case.

Finally, if the lake is controlled by several polluters, the shallow lake economics problem can be reformulated in various game-theoretical settings.

4. On the sensitivity of the shallow lake economics model to welfare specification

A fundamental question important for nearly all mathematical models of real-world phenomena is to what extent the model is robust with respect to modelling assumptions.

In the present paper, this question is discussed with respect to the shallow lake economics model described in Secs. 2–3. Particularly, the sensitivity of the model to the specification of social welfare is explored (Eqs. (9)–(11)).

As discussed in Sec. 3, in the ‘canonical’ shallow lake economics model [Mäler et al., 2003; Wagener, 2013] the social welfare W (Eq. (9)) consists of two terms: the utility U_A logarithmic in loading (Eq. (10)) and the disutility D_E quadratic in pollution (Eq. (11)). It should be noted that the structure of U_A and D_E in the ‘canonical’ model is, in fact, purely heuristic, and, to a large extent, the choice of the structural form for U_A and D_E is made on the ground of tractability of the resultant model.

For instance, logarithmic utilities (like U_A in Eq. (10)) are indeed quite popular in many models of mathematical economics (specifically in economic growth theory); however, a number of ‘competing’ utility specifications does exist that are at least as popular as the logarithmic utility (cf. [Barro and Sala-i-Martin, 2003]). Similarly, the quadratic dependence of disutility D_E on pollution (Eq. (11)) is an ad hoc assumption.

So the question is: how will the shallow lake economics model change if we modify the specification of welfare, hence changing the assumptions about the values of decision-makers and the mechanisms of decision-making?

In the present section, we address this question by conducting numerical experiments with a generalized static shallow lake economics model (Sec. 3) where the quadratic dependence of disutility D_E on pollution (Eq. (11)) is replaced with a more general power law:

$$D_E^{(\beta)} = cs^\beta \quad (13)$$

(note that in the ‘canonical’ shallow lake economics model $\beta = 2$).

As follows from the analysis presented in Secs. 2–3, the ‘canonical’ static shallow lake economics model is essentially defined by numeric values of two non-dimensional parameters, namely, the lake parameter b (Eq. (4)) appearing in the response function, and the pollution cost parameter c appearing in disutility D_E (Eqs. (11) and (13)). With modified disutility $D_E^{(\beta)}$, now dependent on β (Eq. (13)), the parameter β becomes the third key model parameter.

Figure 2, a–d, presents the phase diagrams in the parameter space $b - c$ for the generalized static shallow lake economics model with $\beta = 1.0$; 1.5; 2.0; and 3.0, respectively. For each phase diagram, the horizontal axis corresponds to the lake parameter b , while the vertical axis corresponds to the pollution cost parameter c . The parameter space is split into four domains labeled as 1MAX, LP, HP, and IS, respectively.

The 1MAX domain corresponds to the case where the social welfare as a function of loading has a single local maximum, which is also the global maximum.

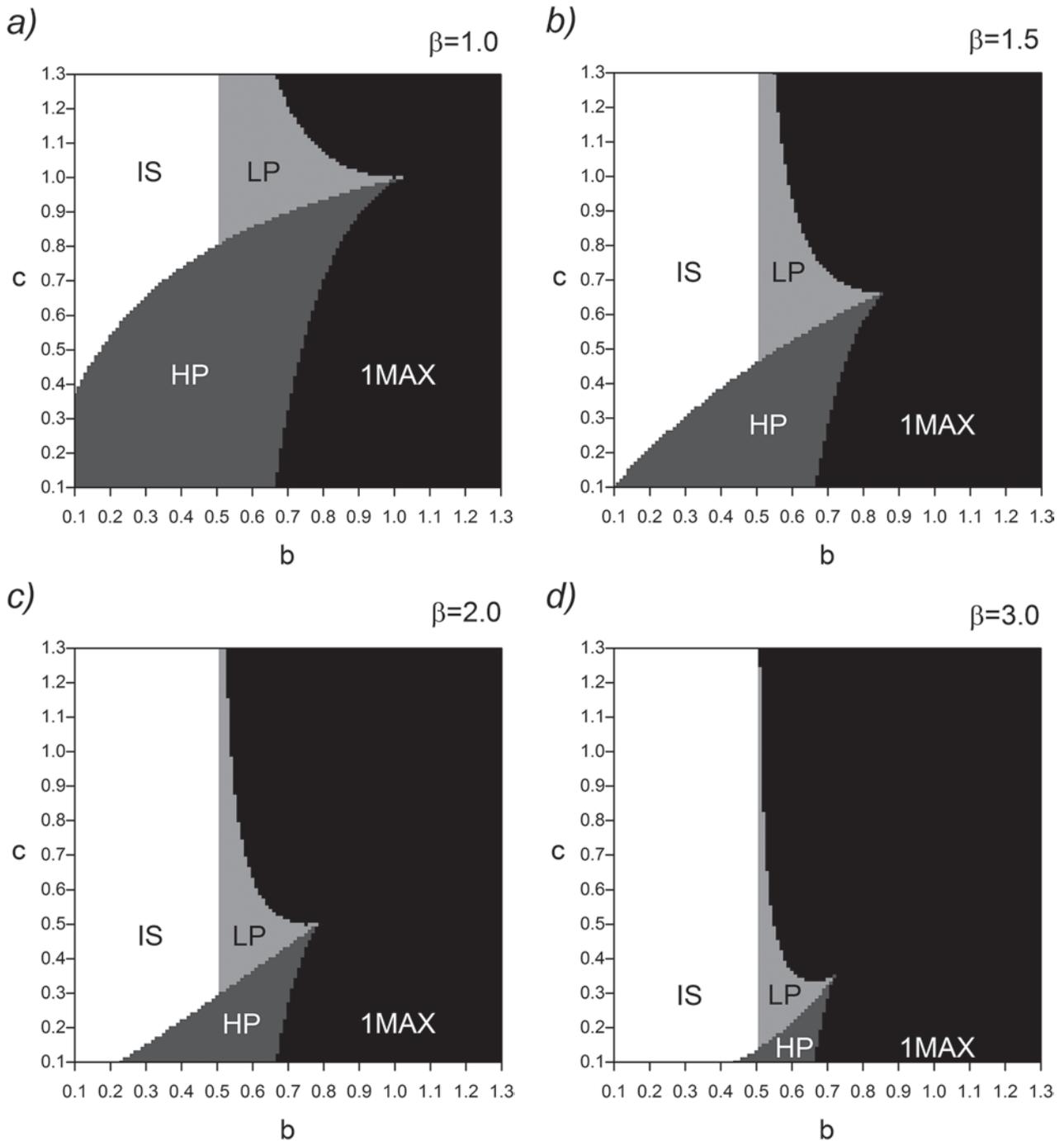


Fig. 2. The phase diagrams for the generalized static shallow lake economics model for four different values of the disutility exponent β : a) $\beta = 1.0$; b) $\beta = 1.5$; c) $\beta = 2.0$; d) $\beta = 3.0$. Horizontal axis: the lake parameter (b). Vertical axis: the pollution cost parameter (c). The labels of the domains on phase diagrams (1MAX, LP, HP, IS) are explained in Sec. 4

In the LP and HP domains, there are two separate local maxima. In the LP domain, the low pollution maximum is the global one, while in the HP domain, the high pollution maximum is the global one.

Finally, in the IS domain the optimal loading depends on the initial state of the system. In fact, in the IS domain the low pollution maximum is higher than the high pollution one, just like in the LP do-

main. However, in the IS domain $b < 0.5$, so the lake dynamics is irreversible (Sec. 2). Hence, dependent on the initial state, this low pollution maximum might, unfortunately, be unreachable.

As follows from Figure 2, for different values of parameter β the positions of boundaries of the domains on phase diagrams are *quantitatively* different; yet, in all cases considered the phase diagram

is *qualitatively* the same. Therefore, we come to a conclusion that the generalized static shallow lake economics model considered in the present section is quantitatively sensitive to varying the value of parameter β in Eq. (13), yet structurally robust.

5. Conclusions

In this paper, we have presented the first results of the analysis of a generalized shallow lake economics model built upon the seminal model by Mäler et al. [2003]. As discussed in Sec. 4, the specification of the social welfare in the initial version of the model [Mäler et al., 2003] was to a large extent made on an ad hoc basis. At the same time, it is precisely the welfare specification that represents the values and preferences of decision-makers, and hence the mechanisms of decision-making, in the 'canonical' shallow lake economics modelling framework.

The social welfare stream, as defined above, consists of two terms: the utility originating from the economic activity in the lake surroundings, and the disutility originating from the pollution of the lake. The model was generalized here by replacing the disutility quadratic in pollution with a more general power law, and the sensitivity of the generalized model to its exponent was explored. The numerical results presented suggest that the generalized model is quantitatively sensitive to varying the value of the exponent, yet structurally robust.

Other possible modifications of the social welfare can of course be analyzed as well. For instance, the logarithmic utility might be replaced with a power law; also, a multiplicative form of welfare function might be considered instead of an additive form. This analysis is, however, left for further research.

The author is grateful to D. V. Pozdnyakov for helpful comments. The research leading to the reported results has received funding from the European Community's Seventh Framework Programme under Grant Agreement No. 308 601 (COMPLEX).

References

Arto I., Capellán-Pérez I., Filatova T., González-Eguino M., Hasselmann K., Kovalevsky D. V., Markandya A., Moghayer S. M., Tariku M. B. Review of existing literature on methodologies to model non-linearity, thresholds and irreversibility in high-impact climate change events in the presence of environmental tipping points. EU FP7 COMPLEX Report D5.2. 31 December 2013. URL: http://owsgip.itc.utwente.nl/projects/complex/complex_files/COMPLEX_Report_D52_2013%2031%2012.pdf (accessed: 17.08.2016).

Astrakhantsev G. P., Menshutkin V. V., Petrova N. A., Rukhovets L. A. Modelirovanie ekosistem bol'shikh stratifitsirovannykh ozer [Modeling ecosystems of large stratified lakes]. St. Petersburg: Nauka, 2003. 363 p.

Barro R. Dzh., Sala-i-Martin Xh. Economic Growth. 2nd edition. Cambridge: The MIT Press, 2003. 672 p.

Carpenter S. R., Cottingham K. L. Resilience and restoration of lakes. *Conservation Ecology*. 1997. Vol. 1, iss. 1. P. 2. URL: <http://www.consecol.org/vol1/iss1/art2/> (accessed: 17.08.2016).

Menshutkin V. V., Rukhovets L. A., Filatov N. N. Matematicheskie modeli vodnykh ekosistem v zadachakh upravleniya resursami ozer [Mathematical models of water ecosystems in lake resource management problems]. *Vodnoe khozyaistvo Rossii* [Water Economy of Russia]. 2014. No. 3. P. 100–107.

Moghayer S., Wagener F. O. O. Bifurcations of indifference points in the discrete time lake pollution management problem. European Association of Environmental and Resource Economists. 19th Annual Conference, 27–30 June 2012, Prague. URL: http://www.webmeets.com/files/papers/EAERE/2012/1028/Lake%20Bifurcation_EAERE_2012.pdf (accessed: 17.08.2016).

Moghayer S. M. Bifurcations of indifference points in discrete time optimal control problems. PhD thesis. Faculty of Economics and Business, Amsterdam School of Economics Research Institute (ASE-RI). Tinbergen Institute Research Series No. 525. 2012. 136 p. URL: <http://hdl.handle.net/11245/1.370551> (accessed: 17.08.2016).

Mäler K.-G., Xepapadeas A., de Zeeuw A. J. The economics of shallow lakes. *Environmental and Resource Economics*. 2003. Vol. 26, iss. 4. P. 603–624. doi: 10.1023/B:EARE.0000007351.99227.42

Pozdnyakov D. V., Korosov A. A., Petrova N. A., Grassl H. Multi-year satellite observations of Lake Ladoga's biogeochemical dynamics in relation to the lake's trophic status. *Journal of Great Lakes Research*. 2013. Vol. 39, Supplement 1. P. 34–45. doi: 10.1016/j.jglr.2013.05.002

Ramsey F. P. A mathematical theory of saving. *The Economic Journal*. 1928. Vol. 38, iss. 152. P. 543–559.

Rukhovets L., Filatov N. (Eds) Ladoga and Onego – Great European Lakes. Observations and Modelling. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2010. 308 p. doi: 10.1007/978-3-540-68145-8

Rukhovets L. A., Filatov N. N. Ozera i klimat: modeli i metody [Lakes and climate: models and methods]. Modeli i metody v probleme vzaimodeistviya atmosfery i gidrosfery [Models and methods in atmosphere/hydrosphere interaction]. Eds V. P. Dymnikov, V. N. Lykosov, E. P. Gordov. Tomsk: Izdatel'skii Dom TGU, 2014. 524 p.

Scheffer M. Ecology of Shallow Lakes. Population and Community Biology Series, Vol. 22. Springer Netherlands. 2004. 357 p. doi: 10.1007/978-1-4020-3154-0

Wagener F. Shallow lake economics run deep: nonlinear aspects of an economic-ecological interest conflict. *Computational Management Science*. 2013. Vol. 10, iss. 4. P. 423–450. doi: 10.1007/s10287-013-0191-5

Received July 29, 2016

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:**Ковалевский Дмитрий Валерьевич**

старший научный сотрудник, к. ф.-м. н.
Международный центр по окружающей среде
и дистанционному зондированию им. Нансена
(Фонд «Нансен-центр»)
14-я линия В. О., 7, оф. 49, Санкт-Петербург,
Россия, 199034

Санкт-Петербургский государственный университет
Университетская наб., 7–9, Санкт-Петербург,
Россия, 199034

эл. почта: d_v_kovalevsky@list.ru,
dmitry.kovalevsky@niersc.spb.ru
тел.: +7 (812) 3245103

CONTRIBUTOR:**Kovalevsky, Dmitry**

Nansen International Environmental and Remote Sensing
Centre (NIERSC)
14th Line 7, office 49, Vasilievsky Island, 199034
St. Petersburg, Russia

Saint Petersburg State University
7–9 Universitetskaya Emb., 199034
St. Petersburg, Russia

e-mail: d_v_kovalevsky@list.ru,
dmitry.kovalevsky@niersc.spb.ru
tel.: +7 (812) 3245103

ХРОНИКА

33-й КОНГРЕСС МЕЖДУНАРОДНОЙ АССОЦИАЦИИ ЛИМНОЛОГОВ (SIL) (Торино, 31 июля – 5 августа 2016 г.)

С 31 июля по 5 августа 2016 года в г. Торино, Италия, проходил очередной, 33-й конгресс SIL (международного общества лимнологов) под лозунгом: «Наука в целях устойчивого использования пресных вод». Как отметил в своем приветственном слове Президент SIL Ив Прери (Yves Prairie), этот лозунг отражает важность проблемы сохранения и использования пресных вод на Земле из-за растущего спроса и ухудшения качества вод многих пресноводных экосистем. Президент отметил важность и необходимость наших знаний для лиц, принимающих решения, для более устойчивого использования водных экосистем. Господин Ив Прери заметил, что мы должны доказать: лимнология вовсе не старомодная дисциплина, она способна понимать все многообразие функционирования сложных систем. На Конгрессе продемонстрировано большое разнообразие тем и проблем, которые решает современная лимнология. Всего было организовано 25 специальных сессий, 38 тем, на которых рассмотрено более 500 устных, включая 8 пленарных и почти 200 стендовых, сообщений. Зарегистрировано свыше 800 участников из более чем шестидесяти стран пяти континентов. Участников из России было девять: трое из ИВПС КарНЦ РАН, Петрозаводск, трое представляли Институт биофизики СО РАН, Красноярск, двое – ЗИН РАН и один – СПбГУ.

Президент SIL кратко остановился на том, что собой представляет современная лимнология. Он отметил, что за последние несколько десятилетий лимнология пополнилась такими разделами, как биогеохимия, экология фитопланктона, экология инвазивных видов,

палеолимнология и ряд других. Но, несмотря на большое разнообразие разделов, которые рассматривает современная лимнология, она является целостной наукой, и ее основу по-прежнему составляют физика, химия и биология. Правда отметим, что физическим процессам в лимнологии уделяется значительно меньше внимания, чем биологии, и на 33-м конгрессе SIL проблемам гидрофизики озер было уделено очень мало внимания. Это же находит отражение и в журнале «Inland waters» (имеет импакт-фактор 1.76 и находится на восьмом месте среди лимнологических журналов мира), и в бюллетене SIL-News, которые сейчас выходят под эгидой SIL. Как серьезную проблему Президент SIL отметил падение количества членов общества за последние 15 лет, которое уменьшается ежегодно на 4 %, а этот процесс мог быть еще более интенсивным, если бы не «активность» новых членов из Китая и Бразилии. Президент предлагал для сохранения и пополнения численности общества принимать как можно больше молодежи, для них введена пониженная ставка членских взносов в SIL, как и для пенсионеров, студентов и членов SIL из развивающихся стран.

Председателем Оргкомитета конгресса являлся профессор Роберто Бертони (Roberto Bertoni), Италия. Отмечу, что в международном оргкомитете конгресса не было ни одного представителя нашей страны, а в секциях SIL остался лишь один представитель России О. Тимошкин.

Президент SIL говорил о необходимости способствовать тому, чтобы лимнология стала больше востребована обществом, повышению

интереса к результатам работы лимнологов. Практика последних лет показала, что люди активно откликаются на проблемы, которые связаны с изменениями уровня воды, наводнениями, штормовыми нагонами, разрушением берегов, и в меньшей степени их волнуют проблемы вселенцев, биологии озер, а именно последним в науке уделяется большее внимание.

Нельзя не сказать об определенных недостатках конгресса. Прежде всего очень высокий оргвзнос – 450 евро для членов SIL и 550 – для участников, не являющихся его членами, – при более чем скромном наборе услуг и документов. Возможно, это объясняется значительным числом секций, для которых пришлось арендовать много помещений в бывшем дворце культуры завода Фиат (а теперь бизнес- и торговый центр). Слишком большое число тем (38) по разным разделам лимнологии было очень трудно посетить, даже по близкой тематике. При этом конгресс не затрагивал крупные проблемы современной лимнологии, которые ранее были характерны для этого мероприятия и широко на нем обсуждались: эвтрофирование, закисление озер, качество вод, проблемы управления ресурсами и другие.

Для расширения интереса к лимнологии, привлечения в общество новых членов Президент предлагал больше внимания уделять сотрудничеству с другими лимнологическими обществами – США, Китая и других стран (к сожалению, в России, которая по числу озер превосходит многие страны мира, ассоциации/общества лимнологов (озероведов) до сих пор

нет). Не в последнюю очередь SIL теряет участников из-за заметной тенденции объединения и активизации бывшей ассоциации американских лимнологов и океанологов (ASLO), которая стала международной и имеет значительно больше членов, чем SIL, – 4300 человек из 58 стран. Эта же тенденция касается и такого мероприятия, как «Большие озера Европы», – регулярного события, которое «выросло» из организованного ИНОЗ РАН регулярного симпозиума «Ладожское озеро и большие озера Европы». В оргкомитете этого мероприятия с 2016 г. «забыли» представителей России. Учитывая потерю определенного авторитета, требуется усилить активность российских озероведов на международной арене, считаем необходимым создание ассоциации (общества) лимнологов России, выпуск специализированного журнала, проведение собственных конгрессов и симпозиумов. Важным является и более тесное сотрудничество с лимнологами стран БРИКС, организация регулярных международных конгрессов озероведов Евразии. Тем более что в Евразии расположены миллионы разнообразных озер, среди которых самое глубокое в мире – Байкал, самое большое по площади – Каспийское море, крупнейшие озера Европы, соленые и горные озера. Может быть, именно ассоциация озероведов стран БРИКС позволит более целенаправленно решать проблемы современной лимнологии Евразии.

Следующий конгресс SIL было решено провести в Китае в 2019 г.

Чл.-корр. РАН Н. Н. Филатов

V МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ «ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ: ИЗУЧЕНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ» (ЛИМНОЛОГИЧЕСКАЯ ШКОЛА-ПРАКТИКА) (Петрозаводск, 5–8 сентября 2016 г.)

С 5 по 8 сентября 2016 г. в Петрозаводске на базе Института водных проблем Севера Карельского научного центра РАН прошла V международная конференция молодых ученых «Водные ресурсы: изучение и управление». Мероприятие является продолжением целенаправленной работы института по подготовке талантливой молодежи для работы в сфере науки и проводится регулярно с 2007 г. В этом году конференция была организована в сотрудничестве с Научно-образовательным центром и Советом молодых ученых ИВПС КарНЦ РАН, Карельским научным центром РАН, Отделением наук о Земле РАН, Федеральным агентством научных организаций, Российским фондом фундаментальных исследований, Российским научным фондом, Университетом г. Хельсинки, Белорусским государственным университетом, Российским государственным

гидрометеорологическим университетом, Санкт-Петербургским государственным университетом, Московским государственным университетом им. М. В. Ломоносова, Отделением Русского географического общества в Республике Карелия и Карельским отделением Гидробиологического общества при РАН.

В работе мероприятия приняли участие более 100 исследователей и специалистов из 29 городов России и 6 иностранных государств, представлявших более 50 отечественных и зарубежных учреждений высшего образования, научных институтов и других организаций.

С приветствием к участникам обратились: сопредседатели Оргкомитета директор Института водных проблем Севера КарНЦ РАН д. г. н. Д. А. Субетто и чл.-корр. РАН Н. Н. Филатов, а также заместитель председателя КарНЦ РАН д. б. н. А. М. Крышень.



Работа конференции осуществлялась по пяти секциям, в которых рассматривалась современная проблематика изучения водных ресурсов Евразийского региона и трансграничных водных объектов России. Освещались вопросы формирования водных ресурсов суши в условиях антропогенных воздействий, реакции водных объектов и их сообществ на изменение климата, вопросы рационального природопользования, охраны и управления водными ресурсами, проведения палеоэкологических и палеоклиматических реконструкций водоемов и их водосборов. Особое внимание было уделено исследованиям, посвященным моделированию гидрологических и экосистемных процессов, формированию и современному состоянию биоресурсов крупных водоемов, применению биоиндикации и биомониторинга, оценке экотоксикологического состояния водных объектов.

В ходе работы конференции представлено 10 пленарных лекций известных специалистов, 60 секционных и 35 стендовых докладов молодых ученых, аспирантов и студентов вузов. В рамках мероприятия были организованы специальные мастер-классы, направленные на ознакомление молодых ученых с деятельностью Отделения Русского географического общества в Республике Карелия, возможностями использования современного оборудования по регистрации параметров окружающей среды и практического применения методов ГИС для изучения водных объектов. Также была проведена серия мастер-классов, посвященных техническим вопросам подготовки и оформления

диссертации и графического материала, особенностям подготовки статьи для рецензируемого журнала и написания заявки для Российского фонда фундаментальных исследований. Информационным туристским центром Республики Карелия проведен интерактивный мастер-класс по возможностям использования территории Республики Карелия для образовательного туризма.

В течение двух дней для участников конференции проводилась научная экскурсия с использованием НИС «Эколог» в Петрозаводской губе Онежского озера, где можно было ознакомиться с особенностями ведения гидрохимических, гидрофизических, гидробиологических работ в полевых условиях.

Для участников конференции были организованы научные экскурсии на известные водные объекты Карелии (бальнеологический курорт «Марциальные воды» и водопад Кивач с посещением заповедника «Кивач» и музея на его территории), Кондопожскую ГЭС, расположенную на берегу Онежского озера, аэрологическую станцию г. Петрозаводска, Музей геологии докембрия в Карельском научном центре РАН и выставку коллекции аномальной древесины лаборатории физиологии и цитологии древесных растений.

В рамках лимнологической школы-практики отдельные участники смогут посетить зимние лимнологические курсы на опытно-научной станции «Ламми» университета г. Хельсинки, которые организованы профессором Матти Леппяранта. В мероприятиях второго этапа запланировано ознакомление с работой станции,



проведение научных лабораторных и полевых исследований, участие в международном семинаре.

Материалы конференции были опубликованы до ее начала в двухтомном сборнике научных трудов, куда вошло 110 печатных работ авторов и коллективов авторов.

Мероприятие проводилось при финансовой поддержке Российского фонда фундамен-

тальных исследований, проект № 16-35-10327, ФАНО, ОНЗ РАН и проектов РНФ (№ 14-17-00766, № 14-17-00740). Материалы конференции представлены на сайте ИВПС КарНЦ РАН (<http://water.krc.karelia.ru>) и размещены в электронной библиотеке (РИНЦ).

Л. А. Беличева, А. В. Толстиков

ВТОРАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ И ШКОЛА МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ «ПАЛЕОЛИМНОЛОГИЯ СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ» (Якутск, 22–27 августа 2016 г.)

С 22 по 27 августа 2016 года в г. Якутске в Северо-Восточном федеральном университете им. М. К. Аммосова состоялась Вторая Международная конференция и школа молодых ученых «Палеолимнология Северной Евразии». Конференция была организована СВФУ им. М. К. Аммосова (Якутск), Институтом водных проблем Севера Карельского научного центра РАН (Петрозаводск), Казанским (Волжским) федеральным университетом (Казань), Институтом полярных и морских исследований им. Альфреда Вегенера – Центром им. Гельмгольца, Потсдам (Германия), палеолимнологической комиссией Русского географического общества.

В последние годы значительно вырос интерес к палеолимнологическим исследованиям Северного полушария, что вызвано, в первую очередь, проблемой глобального изменения климата, особенно в высоких широтах, а во-вторых, все более активным хозяйственным освоением северных территорий. В приполярных областях Северного полушария располагается большое количество озер различного генезиса и морфометрии, в донных отложениях которых заархивирована подробная палеогеографическая информация обо всех изменениях климата и природных обстановок в геологическом прошлом.

Целью конференции и школы являлись анализ современного состояния отечественных



и зарубежных палеолимнологических исследований, обмен знаниями и опытом последних десятилетий в области палеолимнологии, проведение мастер-классов для молодых ученых, аспирантов и студентов, определение перспектив палеолимнологических исследований и разработка планов дальнейших исследований.

Ранее, в 60–80-е годы прошлого столетия в нашей стране проводились на регулярной основе (раз в три года) конференции по истории озер. Одна из задач настоящей конференции – возродить палеолимнологическое направление исследований в России как одно из перспективных научных направлений, позволяющее решать широкий круг научных проблем палеогеографии, палеоклиматологии, эволюции водных экосистем, геоэкологии и ряда других. Предлагалось рассмотреть следующие вопросы: мировой и отечественный опыт и результаты палеолимнологических исследований; основные цели и современные теоретико-методологические основания долговременных палеолимнологических исследований; современные технологии и опыт их применения в палеолимнологии и в палеогеографии; проблемы организации междисциплинарных исследований в палеолимнологии и в палеогеографии; палеогеографические и палеолимнологические исследования на территории Северной Евразии.

Организованная Институтом водных проблем Севера КарНЦ РАН в 2014 г. в Петрозаводске первая Международная конференция «Палеолимнология Севера Евразии» и школа молодых ученых была посвящена проблеме реконструкций палеогеографических и палеоклиматических обстановок Севера Евразии на основе междисциплинарных исследований донных отложений разнотипных озер. На конференции было принято решение о проведении ее на постоянной основе раз в два года. В работе первой конференции приняли участие свыше 100 ученых из России, Финляндии, Германии, Эстонии, Великобритании, США, Ирана, Польши, Белоруссии, представлявших 17 научных учреждений, 6 вузов и 5 зарубежных организаций.

В проведенной в августе 2016 г. конференции приняли участие в очной и заочной форме 179 научных сотрудников и преподавателей, аспирантов и студентов, из которых 121 участник был из России и 58 – из Германии, Канады, Польши, Норвегии, Китая, Англии, Эстонии, Чехии, Турции. Участники конференции представляли 42 научных учреждения (34 российских и 8 зарубежных), 24 высших учебных заведения (10 российских и 14 зарубежных).

В первый день были заслушаны пленарные доклады Д. А. Субетто (Палеолимнологические исследования в Северной Евразии), У. Херцшух





(Взаимодействие между климатом, растительностью и озерами в зоне развития вечномёрзлых грунтов на различных временных шкалах), П. Киттель с соавторами (Эволюция озерных бассейнов в районе р. Сертейя (западная Россия) в контексте развития неолитических поселений) и А. Андреева с соавторами (Новые палинологические данные из постледниковых и приледниковых отложений Ладожского озера). Научные заседания проходили два дня, на них были представлены устные и стендовые доклады по следующим секциям: Обзор палеогеографических, палеолимнологических, палеоклиматических и дендрохронологических исследований Северной Евразии; Эволюция озерных экосистем Севера Евразии в геологическом прошлом; Микропалеонтологические, геологические и радиометрические методы в палеолимнологии; Реконструкция природно-климатических обстановок по палеолимнологическим данным; Разработка палеолимнологической базы данных на основе современного состояния экосистем озер Севера Евразии. В последующие два дня были проведены летняя школа молодых ученых и специалистов на учебной базе СВФУ в с. Еланка (150 км к югу от Якутска на левом берегу р. Лены), научная экскурсия на объект Всемирного наследия ЮНЕСКО Природный парк «Ленские Столбы» и на

тукулан Самыс Кумага (специфическая эоловая форма рельефа на левом берегу р. Лены).

Конференция прошла на очень высоком научном уровне и была хорошо организована, в чем, безусловно, большая заслуга проф. Л. А. Пестряковой. Хотелось бы выразить глубокую благодарность ректору СВФУ им. М. К. Аммосова Е. И. Михайловой и проректору университета К. К. Кривошапкину за организационную и финансовую поддержку и помощь в организации и проведении конференции. Отдельные слова благодарности – сотрудникам университета и в особенности молодым ученым, аспирантам и студентам (Р. Городничеву, И. Ядрихинскому, Л. Ушницкой, С. Левиной, П. Давыдовой и др.) за их неоценимый вклад в организацию мероприятия.

Информация о конференции и материалы представлены на сайтах:

<http://s-vfu.ru/universitet/rukovodstvo-i-struktura/instituty/bgf/2ik/>

<http://sakhapress.ru/archives/213789>

<http://www.sib-science.info/ru/heis/paleolimnologii-29082016>

Следующая, Третья международная конференция «Палеолимнология Северной Евразии» состоится в 2018 году в г. Казани.

Д. А. Субетто, Л. А. Пестрякова

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

(требования к работам, представляемым к публикации
в «Трудах Карельского научного центра Российской академии наук», с 2015 г.)

«Труды Карельского научного центра Российской академии наук» (далее – Труды КарНЦ РАН) публикуют результаты завершённых оригинальных исследований в различных областях современной науки: теоретические и обзорные статьи, сообщения, материалы о научных мероприятиях (симпозиумах, конференциях и др.), персоналии (юбилеи и даты, потери науки), статьи по истории науки. Представляемые работы должны содержать новые, ранее не публиковавшиеся данные.

Статьи проходят обязательное рецензирование. Решение о публикации принимается редакционной коллегией серии или тематического выпуска Трудов КарНЦ РАН после рецензирования, с учётом научной значимости и актуальности представленных материалов. Редколлегия серий и отдельных выпусков Трудов КарНЦ РАН оставляет за собой право возвращать без регистрации рукописи, не отвечающие настоящим правилам.

При получении редакцией рукопись регистрируется (в случае выполнения авторами основных правил её оформления) и направляется на отзыв рецензентам. Отзыв состоит из ответов на типовые вопросы анкеты и может содержать дополнительные расширенные комментарии. Кроме того, рецензент может вносить замечания и правки в текст рукописи. Авторам высылаются электронная версия анкеты и комментарии рецензентов. Доработанный экземпляр автор должен вернуть в редакцию вместе с первоначальным экземпляром и ответом на все вопросы рецензента не позднее чем через месяц после получения рецензии. Перед опубликованием авторам высылаются распечатанная версия статьи, которая вычитывается, подписывается авторами и возвращается в редакцию.

Журнал имеет полноценную электронную версию на базе Open Journal System (OJS), позволяющую перевести предоставление и редактирование рукописи, общение автора с редколлегиями серий и рецензентами в электронный формат и обеспечивающую прозрачность процесса рецензирования при сохранении анонимности рецензентов (<http://journals.krc.karelia.ru/>).

Редакционный совет журнала «Труды Карельского научного центра РАН» (Труды КарНЦ РАН) определил для себя в качестве одного из приоритетов полную открытость издания. Это означает, что пользователям на условиях свободного доступа разрешается: читать, скачивать, копировать, распространять, печатать, искать или находить полные тексты статей журнала по ссылке без предварительного разрешения от издателя и автора. Учредители журнала берут на себя все расходы по редакционно-издательской подготовке статей и их опубликованию.

Содержание номеров Трудов КарНЦ РАН, аннотации и полнотекстовые электронные варианты статей, а также другая полезная информация, включая настоящие Правила, доступны на сайтах – <http://transactions.krc.karelia.ru>; <http://journals.krc.karelia.ru>

Почтовый адрес редакции: 185000, г. Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11, КарНЦ РАН, редакция Трудов КарНЦ РАН. Телефон: (8142) 762018.

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ РУКОПИСИ

Статьи публикуются на русском или английском языке. Рукописи должны быть тщательно выверены и отредактированы авторами.

Объём рукописи (включая таблицы, список литературы, подписи к рисункам, рисунки) не должен превышать: для обзорных статей – 30 страниц, для оригинальных – 25, для сообщений – 15, для хроники и рецензий – 5–6. Объём рисунков не должен превышать 1/4 объёма статьи. Рукописи большего объёма (в исключительных случаях) принимаются при достаточном обосновании по согласованию с ответственным редактором.

При оформлении рукописи применяется полуторный межстрочный интервал, шрифт Times New Roman, кегль 12, выравнивание по обоим краям. Размер полей страницы – 2,5 см со всех сторон. Все страницы, включая список литературы и подписи к рисункам, должны иметь сплошную нумерацию в нижнем правом углу. Страницы с рисунками не нумеруются.

Рукописи подаются в электронном виде в формате MS Word на сайте <http://journals.krc.karelia.ru> либо на e-mail: trudy@krc.karelia.ru, или же представляются в редакцию лично (г. Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11, каб. 502). К рукописи желательно прилагать два бумажных экземпляра, напечатанных на одной стороне листа формата А4 в одну колонку.

ОБЩИЙ ПОРЯДОК РАСПОЛОЖЕНИЯ ЧАСТЕЙ СТАТЬИ

Элементы статьи должны располагаться в следующем порядке: *УДК* курсивом на первой странице, в левом верхнем углу; заглавие статьи на русском языке заглавными буквами полужирным шрифтом; инициалы, фамилии всех авторов на русском языке полужирным шрифтом; полное название организации – места работы каждого автора в именительном падеже на русском языке курсивом (если авторов несколько и работают они в разных учреждениях, следует отметить арабскими цифрами соответствие фамилий авторов учреждениям, в которых они работают; если все авторы статьи работают в одном учреждении, можно не указывать место работы каждого автора отдельно); аннотация на русском языке; ключевые слова на русском языке; инициалы, фамилии всех авторов на английском языке полужирным шрифтом; название статьи на английском языке заглавными буквами полужирным шрифтом; аннотация на английском языке; ключевые слова на английском языке; текст статьи (статья экспериментального характера, как правило, должны иметь разделы: **Введение. Материалы и методы. Результаты и обсуждение. Выводы** либо **Заключение**); благодарности и указание источников финансирования выполненных исследований; списки литературы: с библиографическими описаниями на языке и алфавите оригинала (**Литература**) и транслитерированный в латиницу с переводом русскоязычных источников на английский язык (**References**); таблицы (на отдельных листах); рисунки (на отдельных листах); подписи к рисункам (на отдельном листе).

На отдельном листе дополнительные сведения об авторах: фамилии, имена, отчества всех авторов полностью на русском и английском языке; полный почтовый адрес каждой организации (страна, город) на русском и английском языке; должности, научные звания, ученые степени авторов; адрес электронной почты для каждого автора; телефон для контактов с авторами статьи (можно один на всех авторов).

ЗАГЛАВИЕ СТАТЬИ должно точно отражать содержание статьи* и состоять из 8–10 значимых слов.

АННОТАЦИЯ** должна быть лишена вводных фраз, создавать возможно полное представление о содержании статьи и иметь объем не менее 200 слов. Рукопись с недостаточно раскрывающей содержание аннотацией может быть отклонена.

Отдельной строкой приводится перечень КЛЮЧЕВЫХ СЛОВ (не менее 5). Ключевые слова или словосочетания отделяются друг от друга точкой с запятой, в конце фразы ставится точка. Слова, фигурирующие в заголовке статьи, ключевыми являться не могут.

Раздел «Материалы и методы» должен содержать сведения об объекте исследования с обязательным указанием латинских названий и сводок, по которым они приводятся, авторов классификаций и пр. Транскрипция географических названий должна соответствовать атласу последнего года издания. Единицы физических величин приводятся по Международной системе СИ. Желательна статистическая обработка всех количественных данных. Необходимо возможно точнее обозначать местонахождения (в идеале – с точным указанием географических координат).

Изложение результатов должно заключаться не в пересказе содержания таблиц и графиков, а в выявлении следующих из них закономерностей. Автор должен сравнить полученную им информацию с имеющейся в литературе и показать, в чем заключается ее новизна. Следует ссылаться на табличный и иллюстративный материал так: на рисунки, фотографии и таблицы в тексте (рис. 1, рис. 2, табл. 1, табл. 2 и т. д.), фотографии, помещаемые на вклейках (рис. I, рис. II). Обсуждение завершается формулировкой в разделе «Заключение» основного вывода, которая должна содержать конкретный ответ на вопрос, поставленный во «Введении». Ссылки на литературу в тексте даются фамилиями, например: Карху, 1990 (один автор); Раменская, Андреева, 1982 (два автора); Крутов и др., 2008 (три автора или более) либо начальным словом описания источника, приведенного в списке литературы, и заключаются в квадратные скобки. При перечислении нескольких источников работы располагаются в хронологическом порядке, например: [Иванов, Топоров, 1965; Успенский, 1982; Erwin et al., 1989; Атлас..., 1994; Longman, 2001].

ТАБЛИЦЫ нумеруются в порядке упоминания их в тексте, каждая таблица имеет свой заголовок. На полях бумажного экземпляра рукописи (слева) карандашом указываются места расположения таблиц при первом упоминании их в тексте. Диаграммы и графики не должны дублировать таблицы. Материал таблиц должен быть понятен без дополнительного обращения к тексту. Все сокращения, использованные в таблице, поясняются в Примечании, расположенном под ней. При повторении цифр в столбцах нужно их повторять, при повторении слов – в столбцах ставить кавычки. Таблицы могут быть книжной или альбомной ориентации (при соблюдении вышеуказанных параметров страницы).

РИСУНКИ представляются отдельными файлами с расширением TIF (* .TIF) или JPG. При первичной подаче материала в редакцию рисунки вставляются в общий текстовый файл. При сдаче материала, принятого в печать, все рисунки из текста статьи должны быть убраны и представлены в виде отдельных файлов в вышеуказанном формате. Графические материалы должны быть снабжены распечатками с указа-

* Названия видов приводятся на латинском языке КУРСИВОМ, в скобках указываются высшие таксоны (семейства), к которым относятся объекты исследования.

** Обращаем внимание авторов, что в связи с подготовкой журнала к включению в международные базы данных библиографических описаний и научного цитирования расширенная аннотация на английском языке, а также транслитерированный в латиницу список использованной литературы приобретают особое значение.

нием желательного размера рисунка, пожеланий и требований к конкретным иллюстрациям. На каждый рисунок должна быть как минимум одна ссылка в тексте. Иллюстрации объектов, исследованных с помощью фотосъемки, микроскопа (оптического, электронного трансмиссионного и сканирующего), должны сопровождаться масштабными линейками, причем в подрисуночных подписях надо указать длину линейки. Приводить данные о кратности увеличения необязательно, поскольку при публикации рисунков размеры изменятся. Крупномасштабные карты желательно приводить с координатной сеткой, обозначениями населенных пунктов и/или названиями физико-географических объектов и разной фактурой для воды и суши. В углу карты желательна врезка с мелкомасштабной картой, где был бы указан участок, увеличенный в крупном масштабе в виде основной карты.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ должны содержать достаточно полную информацию, для того чтобы приводимые данные могли быть понятны без обращения к тексту (если эта информация уже не дана в другой иллюстрации). Аббревиации расшифровываются в подрисуночных подписях.

ЛАТИНСКИЕ НАЗВАНИЯ. В расширенных латинских названиях таксонов не ставится запятая между фамилией авторов и годом, чтобы была понятна разница между полным названием таксона и ссылкой на публикацию в списке литературы. Названия таксонов рода и вида печатаются курсивом. Вписывать латинские названия в текст от руки недопустимо. Для флористических, фаунистических и таксономических работ при первом упоминании в тексте и таблицах приводится русское название вида (если такое название имеется) и полностью – латинское, с автором и желательно с годом, например: водяной ослик (*Asellus aquaticus* (L. 1758)). В дальнейшем можно употреблять только русское название или сокращенное латинское без фамилии автора и года опубликования, например, для брюхоногого моллюска *Margarites groenlandicits* (Gmelin 1790) – *M. groenlandicus* или для подвида *M. g. umbilicalis*.

СОКРАЩЕНИЯ. Разрешаются лишь общепринятые сокращения – названия мер, физических, химических и математических величин и терминов и т. п. Все сокращения должны быть расшифрованы, за исключением небольшого числа общеупотребительных.

БЛАГОДАРНОСТИ. В этой рубрике выражается признательность частным лицам, сотрудникам учреждений и фондам, оказавшим содействие в проведении исследований и подготовке статьи, а также указываются источники финансирования работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ. Пристатейные ссылки и/или списки пристатейной литературы следует оформлять по ГОСТ Р 7.0.5-2008. Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления (http://www.bookchamber.ru/GOST_P_7.0.5.-2008). Список работ представляется в алфавитном порядке. Все ссылки даются на языке оригинала (названия на японском, китайском и других языках, использующих нелатинский шрифт, пишутся в русской транскрипции). Сначала приводится список работ на русском языке и на языках с близким алфавитом (украинский, болгарский и др.), а затем – работы на языках с латинским алфавитом. В списке литературы между инициалами ставится пробел.

ТРАНСЛИТЕРИРОВАННЫЙ СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ (References). Приводится отдельным списком, повторяя все позиции основного списка литературы. Описания русскоязычных работ указываются в латинской транслитерации, рядом в квадратных скобках помещается их перевод на английский язык. Выходные данные приводятся на английском языке (допускается транслитерация названия издательства). При наличии переводной версии источника можно указать его библиографическое описание вместо транслитерированного. Библиографические описания прочих работ приводятся на языке оригинала. Для составления списка рекомендуется использование бесплатной программы транслитерации на сайте <http://translit.ru/>, вариант BCI.

Внимание! С 2015 года каждой статье, публикуемой в «Трудах Карельского научного центра РАН», редакцией присваивается уникальный идентификационный номер цифрового объекта (DOI) и статья включается в базу данных Crossref. **Обязательным условием является указание в списках литературы DOI для тех работ, у которых он есть.**

ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ 1-Й СТРАНИЦЫ

УДК 631.53.027.32:635.63

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМОВ ПРЕДПОСЕВНОГО ЗАКАЛИВАНИЯ СЕМЯН НА ХОЛОДОУСТОЙЧИВОСТЬ РАСТЕНИЙ ОГУРЦА

Е. Г. Шерудило¹, М. И. Сысоева¹, Г. Н. Алексейчук², Е. Ф. Марковская¹

¹Институт биологии Карельского научного центра РАН

²Институт экспериментальной ботаники НАН Республики Беларусь им. В. Ф. Купревича

Аннотация на русском языке

Ключевые слова: *Cucumis sativus* L.; кратковременное снижение температуры; устойчивость.

E. G. Sherudilo, M. I. Sysoeva, G. N. Alekseichuk, E. F. Markovskaya. EFFECTS OF DIFFERENT REGIMES OF SEED HARDENING ON COLD RESISTANCE IN CUCUMBER PLANTS

Аннотация на английском языке

Key words: *Cucumis sativus* L.; temperature drop; resistance.

ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ТАБЛИЦЫ

Таблица 2. Частота встречаемости видов нематод в исследованных биотопах

| Биотоп (площадка) | Кол-во видов | Встречаемость видов нематод в 5 повторностях | | | | |
|----------------------|--------------|---|------|------|------|------|
| | | 100 % | 80 % | 60 % | 40 % | 20 % |
| 1Н | 26 | 8 | 4 | 1 | 5 | 8 |
| 2Н | 13 | 2 | 1 | 1 | 0 | 9 |
| 3Н | 34 | 13 | 6 | 3 | 6 | 6 |
| 4Н | 28 | 10 | 5 | 2 | 2 | 9 |
| 5Н | 37 | 4 | 10 | 4 | 7 | 12 |

Примечание. Здесь и в табл. 3–4: биотоп 1Н – территория, заливаемая в сильные приливы; 2Н – постоянно заливаемый луг; 3Н – редко заливаемый луг; 4Н – незаливаемая территория; 5Н – периодически заливаемый луг.

ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ПОДПИСИ К РИСУНКУ

Рис. 1. Северный точильщик (*Hadrobregmus confuses* Kraaz.)

ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ СПИСКА ЛИТЕРАТУРЫ

Ссылки на книги

Вольф Г. Н. Дисперсия оптического вращения и круговой дихроизм в органической химии / Ред. Г. Снатцке. М.: Мир, 1970. С. 348–350.

Патрушев Л. И. Экспрессия генов. М.: Наука, 2000. 830 с.

Knorre D. G., Laric O. L. Theory and practice in affinity techniques / Eds P. V. Sundaram, F. L. Eckstein. N. Y., San Francisco: Acad. Press, 1978. P. 169–188.

В транслитерированном списке литературы:

Vol'f G. N. Dispersiya opticheskogo vrashheniya i krugovoj dikhroizm v organicheskoy khimii [Optical rotatory dispersion and circular dichroism in Organic Chemistry]. Ed. G. Snattske. Moscow: Mir, 1970. P. 348–350.

Patrushev L. I. Ekspressiya genov [Gene expression]. Moscow: Nauka, 2000. 830 p.

Knorre D. G., Laric O. L. Theory and practice in affinity techniques. Eds P. V. Sundaram, F. L. Eckstein. N. Y., San Francisco: Acad. Press, 1978. P. 169–188.

Ссылки на статьи

Викторов Г. А. Межвидовая конкуренция и сосуществование экологических гомологов у паразитических перепончатокрылых // Журн. общ. биол. 1970. Т. 31, № 2. С. 247–255.

Grove D. J., Loisesides L., Nott J. Satiation amount, frequency of feeding and emptying rate in *Salmo gairdneri* // J. Fish. Biol. 1978. Vol. 12, no. 4. P. 507–516.

Noctor G., Queval G., Mhamdi A., Chaouch A., Foyer C. H. Glutathione // Arabidopsis Book. American Society of plant Biologists, Rockville, MD. 2011. doi:10.1199/tab.0142

В транслитерированном списке литературы:

Viktorov G. A. Mezvidovaya konkurentsiya i sosushhestvovanie ehkologicheskikh gomologov u paraziticheskikh pereponchatokrylykh [Interspecific competition and coexistence ecological homologues in parasitic Hymenoptera]. Zhurn. obshh. biol. 1970. Vol. 31, no. 2. P. 247–255.

Grove D. J., Loisesides L., Nott J. Satiation amount, frequency of feeding and emptying rate in *Salmo gairdneri*. J. Fish. Biol. 1978. Vol. 12, no. 4. P. 507–516.

Noctor G., Queval G., Mhamdi A., Chaouch A., Foyer C. H. Glutathione. Arabidopsis Book. American Society of plant Biologists, Rockville, MD. 2011. doi:10.1199/tab.0142

Ссылки на материалы конференций

Марьянских Д. М. Разработка ландшафтного плана как необходимое условие устойчивого развития города (на примере Тюмени) // Экология ландшафта и планирование землепользования: тезисы докл. Всерос. конф. (Иркутск, 11–12 сент. 2000 г.). Новосибирск, 2000. С. 125–128.

В транслитерированном списке литературы:

Mar'yinskikh D. M. Razrabotka landshaftnogo plana kak neobkhodimoe uslovie ustoichivogo razvitiya goroda (na primere Tyumeni) [Landscape planning as a necessary condition for sustainable development of a city (example of Tyumen)]. *Ekologiya landshafta i planirovanie zemlepol'zovaniya: tezisy dokl. Vseros. konf. (Irkutsk, 11–12 sent. 2000 g.)* [Landscape ecology and land-use planning: abstracts of all-Russian conference (Irkutsk, Sept. 11–12, 2000)]. Novosibirsk, 2000. P. 125–128.

Ссылки на диссертации или авторефераты диссертаций

Шефтель Б. И. Экологические аспекты пространственно-временных межвидовых взаимоотношений землероек Средней Сибири: автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 1985. 23 с.

Лозовик П. А. Гидрогеохимические критерии состояния поверхностных вод гумидной зоны и их устойчивости к антропогенному воздействию: дис. ... докт. хим. наук. Петрозаводск, 2006. 481 с.

В транслитерированном списке литературы:

Sheftel' B. I. *Ekologicheskie aspekty prostranstvenno-vremennykh mezvidovykh vzaimootnoshenii zemlerоек Srednei Sibiri* [Ecological aspects of spatio-temporal interspecies relations of shrews of Middle Siberia]: Summary of PhD (Cand. of Biol.) thesis. Moscow, 1985. 23 p.

Lozovik P. A. *Gidrogeokhimicheskie kriterii sostoyaniya poverkhnostnykh vod gumidnoi zony i ikh ustoichivosti k antropogennomu vozdeistviyu* [Hydrogeochemical criteria of the state of surface water in humid zone and their tolerance to anthropogenic impact]: DSc (Dr. of Chem.) thesis. Petrozavodsk, 2006. 481 p.

Ссылки на патенты

Патент РФ № 2000130511/28.04.12.2000.

Еськов Д. Н., Серегин А. Г. Оптико-электронный аппарат // Патент России № 2122745. 1998. Бюл. № 33.

В транслитерированном списке литературы:

Patent RF № 2000130511/28. 04.12.2000 [Russian patent No. 2000130511/28. December 4, 2000].

Es'kov D. N., Seregin A. G. *Optiko-elektronnyi apparat* [Optoelectronic apparatus]. Patent Rossii № 2122745 [Russian patent No. 2122745]. 1998. Bulletin No. 33.

Ссылки на архивные материалы

Гребенщиков Я. П. К небольшому курсу по библиографии: материалы и заметки, 26 февр. – 10 марта 1924 г. // ОР РНБ. Ф. 41. Ед. хр. 45. Л. 1–10.

В транслитерированном списке литературы:

Grebenshchikov Ya. P. *K nebol'shomu kursu po bibliografii: materialy i zametki, 26 fevr. – 10 marta 1924 g.* [Brief course on bibliography: the materials and notes, Febr. 26 – March 10, 1924]. OR RNB. F. 41. St. un. 45. L. 1–10.

Ссылки на интернет-ресурсы

Паринов С. И., Ляпунов В. М., Пузырев Р. Л. Система Соционет как платформа для разработки научных информационных ресурсов и онлайн-сервисов // Электрон. б-ки. 2003. Т. 6, вып. 1. URL: <http://www.elbib.ru/index.phtml?page=elbib/rus/journal/2003/part1/PLP/> (дата обращения: 25.12.2015).

Демография. Официальная статистика / Федеральная служба государственной статистики [Электронный ресурс]. URL: <http://www.gks.ru/> (дата обращения: 25.12.2015).

В транслитерированном списке литературы:

Parinov S. I., Lyapunov V. M., Puzyrev R. L. *Sistema Sotsionet kak platforma dlya razrabotki nauchnykh informatsionnykh resursov i onlainovykh servisov* [Socionet as a platform for development of scientific information resources and online services]. *Elektron. b-ki [Digital library]*. 2003. Vol. 6, iss. 1. URL: <http://www.elbib.ru/index.phtml?page=elbib/rus/journal/2003/part1/PLP/> (accessed: 25.11.2006).

Demografiya. Oficial'naja statistika [Demography. Official statistics]. *Federal'naja sluzhba gosudarstvennoj statistiki [Federal state statistics service]*. URL: <http://www.gks.ru/> (accessed: 25.12.2015).

Ссылки на электронные ресурсы на CD-ROM

Государственная Дума, 1999–2003 [Электронный ресурс]: электронная энциклопедия / Аппарат Гос. Думы Федер. Собрания Рос. Федерации. М., 2004. 1 CD-ROM.

В транслитерированном списке литературы:

Gosudarstvennaya Duma, 1999–2003 [State Duma, 1999–2003]. Electronic encyclopedia. The office of the State Duma of the Federal Assembly of the Russian Federation. Moscow, 2004. 1 CD-ROM.

TABLE OF CONTENTS

HYDROPHYSICS. HYDROLOGY

- T. Yu. Vyruchalkina, N. N. Filatov, N. A. Diansky, A. V. Gusev. ON FORECASTING LONG-TERM VARIATIONS OF WATER LEVEL IN LARGE LAKES 3
- N. I. Palshin, T. V. Efremova, R. E. Zdorovenov, G. E. Zdorovenova. HEAT TRANSFER IN AN ICE-COVERED SMALL LAKE 17
- A. V. Litvinenko, M. S. Bogdanova, I. A. Litvinova. ECONOMIC MANAGEMENT OF WATER RESOURCES IN THE NEAR-SHORE ZONE OF LAKE ONEGO: CURRENT STATE AND DYNAMICS . . . 27

HYDROCHEMISTRY AND BOTTOM SEDIMENTS

- A. V. Ryzhakov, M. V. Zobkova, P. A. Lozovik. PATTERNS IN THE CONCENTRATION AND DISTRIBUTION OF PHOSPHORUS FORMS IN WATER BODIES OF THE HUMID ZONE 33
- G. Yu. Voroniuk, G. S. Borodulina, I. A. Krainyukova, I. V. Tokarev. GROUNDWATER EXCHANGE IN THE BALTIC SHIELD MARGINAL AREAS AND ADJACENT ARTESIAN BASINS BASED ON ISOTOPE AND HYDROCHEMISTRY DATA. SCIENTIFIC PROBLEMS AND PRACTICAL APPLICATIONS. KARELIAN ISTHMUS 46
- V. S. Valiev, D. V. Ivanov, I. I. Ziganshin, D. E. Shamaev, V. V. Malanin, A. A. Marasov. METALS FORMS DISTRIBUTION IN LAKES SEDIMENTS OF NATURAL AND URBAN AREAS OF THE REPUBLIC OF TATARSTAN 57
- A. V. Sabylina. ORGANIC CARBON, TOTAL PHOSPHORUS AND TOTAL NITROGEN INFLOW TO LAKE ONEGO WITH STREAM RUNOFF, AND THEIR REMOVAL BY SVIR RIVER WATERS IN 1965–2008 68

HYDROBIOLOGY AND ICHTHYOLOGY

- E. M. Zubova, N. A. Kashulin, P. M. Terentjev. GO TO THE METHOD OF GROWTH RATE BACK-CALCULATION OF WHITEFISH *COREGONUS LAVARETUS* (L.) IN RESERVOIRS OF NORTHERN FENNOSCANDIA 78
- Yu. S. Datsenko. ESTIMATION OF THE CRITICAL VALUE OF A WATER BODY'S PRIMARY PRODUCTION FOR ANOXIC ZONE EMERGENCE 90

RESEARCH METHODS

- Yu. A. Salo, L. E. Nazarova, A. F. Balagansky. COMPUTATIONS OF EVAPORATION FROM WATERSHEDS OF NORTH-WESTERN RUSSIA 95
- D. V. Kovalevsky. ON THE SENSITIVITY OF ECOLOGICAL ECONOMICS MODELS OF LAKE WATER RESOURCE MANAGEMENT TO THE WELFARE FUNCTION PARAMETERS 102

CHRONICLE

- N. N. Filatov. The 33rd Congress of the International Society of Limnology (SIL) (Torino, July 31–August 5, 2016) 109

| | |
|--|-----|
| L. A. Belicheva, A. V. Tolstikov. The 5th International Young Scientists Conference “Water Resources: Research And Management” (WRRM) (Limnological School and Workshop) (Petrozavodsk, September 5–8, 2016) | 111 |
| D. A. Subetto, L. A. Pestryakova. The 2 nd International Conference and Young Scientists Meeting “Paleolimnology of Northern Eurasia” (Yakutsk, August 22–27, 2016) | 114 |
| INSTRUCTIONS FOR AUTHORS | 117 |

Научное издание

**Труды Карельского научного центра
Российской академии наук**
№ 9, 2016

Серия ЛИМНОЛОГИЯ

*Печатается по решению
Президиума Карельского научного центра РАН*

Выходит 12 раз в год

Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-65995 от 06.06.2016 г.
выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций

Редактор А. И. Мокеева
Компьютерная верстка Г. О. Предтеченский

Подписано в печать 22.09.2016. Дата выхода 30.09.2016. Формат 60x84^{1/8}.
Печать офсетная. Уч.-изд. л. 12,4. Усл. печ. л. 14,4.
Тираж 200 экз. Заказ 381. Цена свободная

Учредитель и издатель: Карельский научный центр РАН, 185910, г. Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11

Оригинал-макет: Редакция научного издания «Труды КарНЦ РАН»

Типография: Редакционно-издательский отдел КарНЦ РАН
185003, г. Петрозаводск, пр. А. Невского, 50